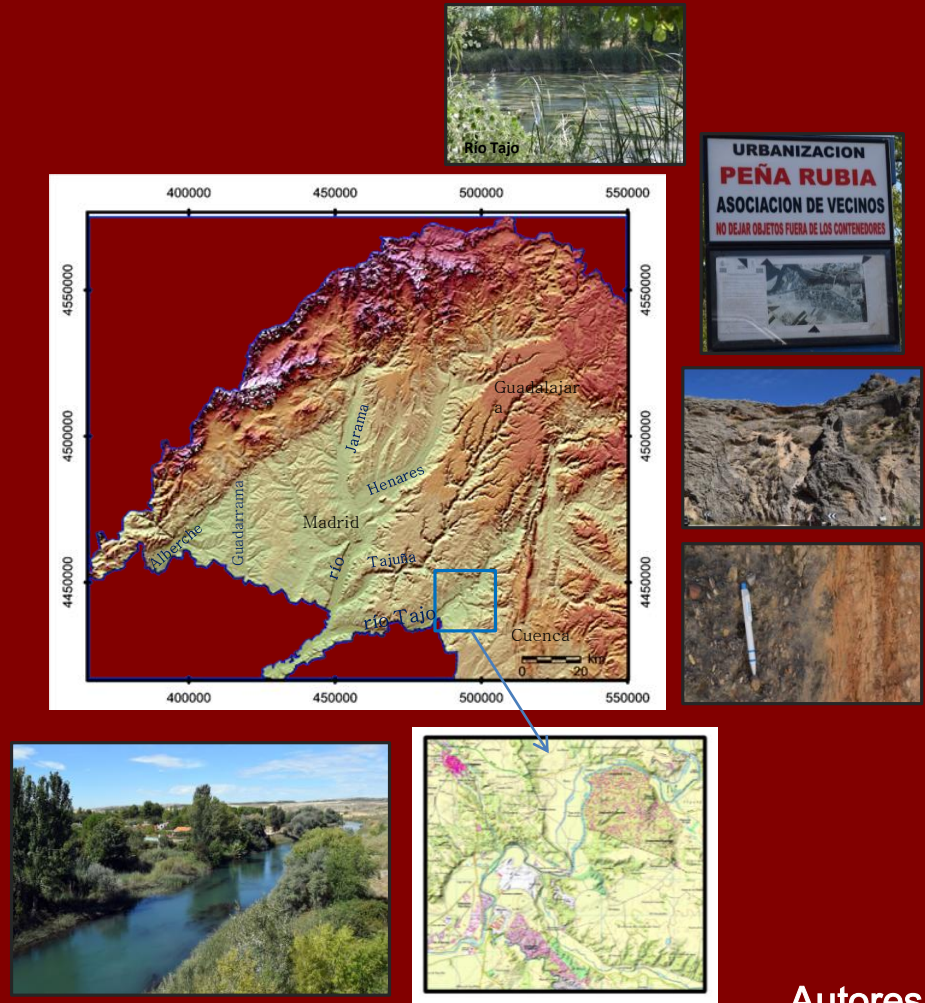


Sellado de suelos a partir de teledetección y SIG: estudio en el Tajo medio-alto



Autores:

Pilar García Rodríguez
M^a Eugenia Pérez González
José María García Alvarado
M^a Manuela Redondo García
Juan José Sanz Donaire
Ángel Navarro Madrid

Dpto. Análisis Geográfico Regional y Geografía Física
Universidad Complutense de Madrid

Sellado de suelos a partir de teledetección y SIG: estudio en el Tajo medio-alto

Autores:

M^a del Pilar García Rodríguez

M^a Eugenia Pérez González

José María García Alvarado

M^a Manuela Redondo García

Juan José Sanz Donaire

Ángel Navarro Madrid

Dpto. Análisis Geográfico Regional y Geografía Física

Universidad Complutense de Madrid

Esta guía ha sido realizada en el marco del Proyecto de Innovación y Mejora de la Calidad Docente, nº 170 (2014) convocado por el Vicerrectorado de Evaluación de la Calidad de la Universidad Complutense de Madrid y financiado por el Proyecto CSO2012-34785 del Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto I+D, Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica).

Asimismo quiere agradecerse la financiación y mantenimiento del software científico utilizado (ERDAS imagine) por parte de la Facultad de Geografía e Historia de la Universidad Complutense de Madrid, imprescindible para la realización de esta guía.

ÍNDICE

Introducción	
Material y métodos	6
Área de estudio	8
Análisis e interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite	22
Análisis visual de las imágenes de satélite	23
Análisis digital de las imágenes de satélite	26
I) Mejoras espaciales	26
II) Mejoras radiométricas	28
III) Mejoras espectrales	29
a) Análisis factorial en componentes principales	29
b) Tasseled cap	32
c) Transformación RGB a IHS	31
Marcador no definido.	
d) Transformación IHS a RGB	34
e) Índices	36
IV) Perfiles espectrales, espaciales y superficiales	48
V) Análisis de cambios temporales	52
VI) Clasificación sin supervisar	54
Cambios en el paisaje vegetal	55
Análisis y comentario de imágenes geográficas	61
Conclusiones	64
Bibliografía	64

INTRODUCCIÓN

La concesión de un Proyecto de Innovación y Mejora de la calidad docente en el año 2012 tuvo como resultado la publicación de una “Guía Práctica de Teledetección y Fotointerpretación”. En el 2013 la concesión de un nuevo proyecto PIMCD permitió ampliar estos estudios con la publicación de una nueva guía “Casos prácticos de Fotointerpretación y Teledetección”. En ambas Guías se estudiaron diversas áreas próximas a la Comunidad de Madrid realizando, mediante estas técnicas, estudios del medio físico y antrópico: geología, geomorfología, suelos, vegetación, acción antrópica, etc. Propusimos estos temas dado que, a lo largo de nuestra trayectoria docente, vimos que había una gran carencia de material práctico que puedan utilizar los alumnos de Grado y Máster para las asignaturas de Teledetección y de Fotointerpretación y, que en todo caso, la bibliografía existente, era muy general, enfocada hacia las técnicas sin aplicación a casos concretos. El éxito obtenido con estas Guías entre los alumnos nos llevaron a solicitar un nuevo PIMCD en el año 2014 con el fin de completar la formación para estas asignaturas ya que al realizar estos manuales comprendimos que no solo es importante que los alumnos se familiaricen con estas técnicas y programas sino que también deben ver su utilidad para realizar cartografía a distintas escalas que permita analizar los problemas sobre el medio físico debido a la acción antrópica. Así, esta cartografía es imprescindible para estudios de impacto ambiental, vulnerabilidad de los ecosistemas y riesgos debidos a una mala planificación territorial.

Cuando solicitamos el Proyecto la idea era seleccionar varias áreas afectadas por estos problemas. La ausencia de financiación nos ha llevado a limitar nuestro proyecto a un caso concreto. Dado que la mayor parte de los miembros del equipo trabajan en un Proyecto financiado por el Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica del Ministerio de Educación y Cultura con título: “*Sellado de Suelo en la Comunidad de Madrid y Áreas Limítrofes. Estudio Mediante Teledetección y Sistemas de Información Geográfica*” decidimos que la única forma de poder realizar el Proyecto PIMCD era utilizar en parte los medios y equipos disponibles a partir del Proyecto Nacional y seleccionar una de las áreas para hacer un estudio de detalle o con un enfoque más didáctico. Esto nos ha permitido financiar los trabajos de campo necesarios para realizar estudios en el terreno, tomar fotografías in situ y utilizar la cartografía disponible.

Para ello se ha seleccionado como caso piloto un área localizada al sudeste de la Comunidad de Madrid, en el límite con la Comunidad de Castilla La Mancha, afectando a las provincias de Cuenca, Guadalajara y Madrid, en las vegas y terrazas del río Tajo y muy influenciada por el “efecto frontera”. Se ha analizado el sellado del suelo y la evolución del paisaje vegetal.

Aquí se asienta la urbanización El Soto- Río Llano perteneciente al municipio de Illana desarrollada en las décadas de los 70 y 80 del pasado siglo y que se sitúa en áreas con alto riesgo de inundación: llanura de inundación y primeras terrazas del río Tajo sin

que la normativa existente haya impedido su construcción. También se han seleccionado unas urbanizaciones localizadas en la margen derecha del río y pertenecientes a Madrid,

En sus proximidades hay dos explotaciones mineras con alto impacto: al norte de la urbanización El Soto-Río Llano, en las terrazas de la margen derecha hay canteras de yesos y en las proximidades de la urbanización El Ballestar, en la margen izquierda del río Tajo (perteneciente a Barajas de Melo, Cuenca), hay explotaciones de áridos. Otras explotaciones se sitúan en la margen derecha, en el municipio de Estremera.

El gran boom urbanístico de las últimas décadas del pasado siglo y los precios elevados del suelo en la Comunidad de Madrid condujo a que numerosos habitantes de esta Comunidad decidieran establecer su segunda residencia en áreas próximas de la Comunidad de Castilla La Mancha. Esto ha llevado a la proliferación de urbanizaciones en los límites provinciales que han incumplido todas las normas urbanísticas y de planificación, poniendo en serio riesgo no solo el medio ambiente sino incluso la integridad de las vidas humanas. Las proximidades de los grandes ríos, con áreas llanas y suelos fértiles han sido las grandes perjudicadas. Además de la pérdida de suelo por crecimiento urbanístico, fácilmente observable y medible mediante imágenes de satélite y fotografías aéreas, se quiere destacar la inadecuación de algunos proyectos urbanísticos recientes, que repiten e incrementan los errores medioambientales del pasado, aún a riesgo de poner en peligro la vida y los bienes de las personas.

El objetivo del Proyecto es establecer una metodología de trabajo que ayude a la detección y posterior medida del sellado de suelos. La accesibilidad a bases de datos, material cartográfico e imágenes de satélite facilita la actualización de cartografía temática, que pretende en esta ocasión, determinar asentamientos en áreas de riesgo de diversa índole y dar información a los gestores del territorio sobre aspectos medioambientales que deberían tenerse en cuenta al clasificar o reclasificar los suelos de cada municipio.

Además de la pérdida de suelo por crecimiento urbano, fácilmente observable mediante imágenes de satélite y fotografías aéreas, se quiere destacar la inadecuación de algunos proyectos urbanísticos recientes, que repiten e incrementan los errores medioambientales del pasado, aún a riesgo de poner en peligro la vida y los bienes de las personas. Este sellado implica también un cambio importante en el paisaje vegetal de un área con importante vegetación de ribera.

MATERIAL Y METODOS

Se han utilizado fotografías aéreas, tanto actuales como de la serie histórica, e imágenes de satélite y fotografías tomadas en el campo.

Las fotografías aéreas corresponden a los vuelos y fotogramas:

Vuelo americano (1956-57) serie B, fotogramas nº 133-134-135, 205-206-207

Vuelo interministerial (1973-86), MTN 584 y 607

Vuelo nacional 1980-86, MTN 607 Pasada J fotogramas 5- 6- 7 Pasada M 5- 6-7

Ortofoto forestal (2000-2003) Provincias de Guadalajara y de Cuenca

Ortofoto de 2010 del IGN

Las imágenes de satélite corresponden al satélite Spot 5 y a dos satélites de la serie Landsat (5 y 8) y se han obtenido del Instituto Geográfico Nacional (Plan Nacional de Teledetección www.ign.es), de la Universidad de Maryland (<http://glcf.umd.edu>) y del Servicio Geológico de Estado Unidos (<http://glovis.usgs.gov/>), Tabla 1.

<i>SATÉLITE</i>	<i>SENSOR</i>	<i>ESCENA</i>	<i>FECHA</i>	<i>FUENTE</i>
LANDSAT 5	TM	201-3	18-08-1984	http://glcf.umd.edu
LANDSAT 8	OLI	201-32	16-06-2013	http://glovis.usgs.gov/
SPOT 5	HRG	269-36	09-08-2013	http://www.ign.es

Tabla 1. Imágenes de satélite y fuentes utilizadas

Las imágenes se han sometido a distintos tratamientos visuales y digitales: mejoras espaciales, mejoras radiométricas, mejoras espectrales, índices y clasificaciones, entre las que cabe destacar:

- Mejoras espaciales: filtros y mezclas de imágenes con distintas resoluciones
- Mejoras radiométricas: ecualización del histograma
- Mejoras espectrales: mezcla de bandas, análisis en componentes principales, Tasseled cap, transformaciones IHS a RGB y RGB a IHS.
- Índices: Índice de Edificación de la diferencia normalizada (NDBI), Índice de suelos, óxidos de hierro, composición mineral, composición hidrotermal, Índice de Vegetación de la diferencia normalizada (NDVI), Índice de vegetación ajustada con el suelo (SAVI), mejora de la absorción de clorofila, Índice del agua, índice de stress a la humedad, índice del suelo e índice de infrarrojos medios.
- Comparación de imágenes de diferentes fechas
- Clasificación sin supervisar y evaluación de los resultados mediante la matriz de confusión.

En la imagen del satélite Landsat 8 solo se han utilizado seis bandas: azul, verde, rojo, infrarrojo próximo y dos infrarrojos medios a las que hemos asignado una numeración del 1 al 6 respectivamente, pero que en realidad corresponden a las bandas 2 al 7 de este sensor, ya que hemos descartado la primera banda (0,43-0,45 micrómetros, aerosoles de costa) por no resultar adecuada para nuestro estudio.

También se ha utilizado como cartografía y bases de datos de apoyo:

- Mapa Topográfico Nacional 1:25.000 digital 584-3 (Mazuecos) y 607-1 (Tarancón), (www-ign.es)
- Mapa Geológico del IGME (www.igme.es) de la serie MAGNA, escala 1:50.000. Corresponde a la Hoja 584 (21-23) de Mondéjar.
- Mapa de suelos 1:250.000 de la provincia de Guadalajara (Guerra *et al.* 1970) y se ha adaptado a la clasificación WRBSR, FAO 2011
- Fotografía aéreas de los años 50 - 80 del pasado siglo, obtenidas del visor de la Información Territorial y Cartografía Regional de la Comunidad de Madrid (<http://www.madrid.org/>)
- Servidores de Cartografía de la sede virtual del catastro, incorporados la información del SIGPAC (Ministerio de Agricultura, Alimentación y medioambiente, (<http://sigpac.mapa.es/fega/visor/>) y el PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, www.ign.es/pnoa)
- Base de datos municipales de Caja España (www.internotes.cajaespana.es)
- Base de datos del Nomenclator de entidades de población (www.ine.es/nomen2/)
- Mapa forestal

Los programas utilizados para este estudio son: Erdas Imagine 2013 y ArcGis10.1.

ÁREA DE ESTUDIO

Este trabajo se centra en el tramo medio-alto del río Tajo. El Tajo constituye una de las corrientes fluviales más importantes, por su longitud (de unos 1000 km), superficie de la cuenca (algo superior a los 80.000 km²) así como por su caudalosidad (que en la desembocadura arroja un módulo de 500 m³/s), de España y, por ende, de toda la Península Ibérica. Presenta, en cartografía, la típica traza que corresponde a la descentrada localización de las divisorias de aguas hispanas, más próximas al Mediterráneo que al Atlántico, fruto de un basculamiento inverso del Macizo Hespérico desde el Mesozoico, en que se inclinaba a Oriente, hacia el Mar de Thetys, hasta la génesis tardicenoica del Surco Levantino en el Mediterráneo Occidental, que propició la inclinación actual hacia el Atlántico.

En su recorrido nace en plena Cordillera Ibérica, en la Muela de San Juan, en las lindes de las provincias de Cuenca y Teruel, y atraviesa en su totalidad la rama castellana de la Ibérica, ingresando al pasar la presa de Entrepeñas en la Fosa de Madrid, ciñéndose al borde fallado y fosilizado por depósitos de la cuenca en los kilómetros inmediatos a ese ingreso, para señorear después por el fondo de la sineclise tagana, delimitada ésta por los rebordes septentrional –del Sistema Central- y meridional –de los Montes de Toledo-, si bien más próximo a este límite S, dada la localización de las diferentes dovelas y sus alturas relativas, en definitiva, merced a la localización del depocentro de la Fosa madrileña. El Tajo alcanza en esta depresión un umbral rocoso de singular importancia en el Torno de Toledo, que ejerce de nivel de base local con la consiguiente distribución de depósitos en terrazas aluviales. Aguas abajo de la capital castellano-manchega, el río vaga por la semifosa del Tajo occidental para, a partir de Puente del Arzobispo y Valdeverdeja, disecar los materiales antiguos del Macizo Hespérico aflorantes a mediodía del Campo Arañuelo y la Extremadura cacereña.

En una segunda aproximación, queremos destacar el paisaje del embalse de Entrepeñas, en el que la corriente corta un inmenso pliegue-falla en calizas cretácicas masivas, donde se localiza la cerrada apropiada para la instalación de la presa, tras la cual el río se abre a una campiña de laderas menos empinadas, labrada en los materiales ya marinos en tránsito a continentales del Paleógeno, abandonando numerosas terrazas aluviales de potencias importantes, con frecuencia cortadas por las trincheras de la carretera de Sacedón a Sayatón (CM 2009) vía Anguix. En dichos cortes se puede admirar una activa tectónica de fractura que colapsa los materiales aluviales, por lo general depositados sobre yesos en masa.

El río serpentea, no obstante las lineaciones impuestas por las fallas del contacto mecánico entre la Sierra de Altomira –como avanzadilla de la Cordillera Ibérica- y la depresión tagana alcarreña y de Madrid. Así, incide, entre el paraje conocido como Cerrillo Joso y la presa de Bolarque, en los terrenos mesozoicos de preferencia caliza que cierran las incorporaciones de los afluentes Guadiela, Mayor y Guadamejud al Tajo (embalse de Buendía). El Tajo se comporta aquí del modo en que lo hiciera aguas arriba en torno a Trillo, donde también pueden admirarse bellos ejemplos de meandros encajados. El tramo que comentamos es pues muestra de la sobreimposición del río a unos terrenos mesozoicos estructurados en un pliegue-falla (inversa) que montan a los depósitos paleógenos igualmente plegados por los mismos diastrofismos, y fosilizados por los sedimentos horizontales (aclinales) miocénicos.

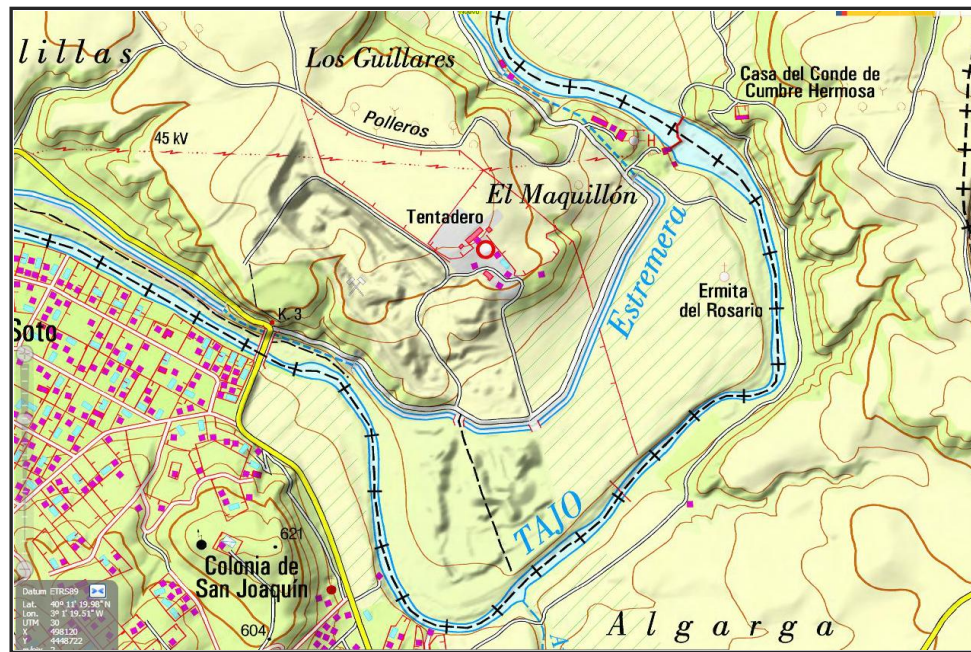


Fig. 1. Extracto del mapa topográfico 1/25.000. Detalle de las terrazas del río

Aguas abajo, entre el poblado de la Central Nuclear “José Cabrera” en las inmediaciones de Albalate y Almonacid de Zorita y la Colonia de San Joaquín y la urbanización de El Soto, en el puente entre Estremera e Illana, señorean los bucles de los meandros libres que tienen su más excelso paradigma en la curva de El Maquillón, frente a la casa del Conde de Cumbre Hermosa. En este lugar se produce la inmersión de las terrazas antiguas del Tajo, que son sepultadas por los depósitos aluviales más modernos en un claro ejemplo de paso de terrazas escalonadas a encajadas. Esta realidad ha propiciado la anormal potencia de los depósitos aluviales, que tendrían en términos hidrogeológicos un aprovechamiento grandioso al haberse sumado las potencias de varias terrazas, pero que, a las orillas de uno de los ríos más caudalosos de España, y a tenor de la proximidad a un centro de amplia construcción como el capitalino, ha significado la explotación de las graveras y areneros, en la actualidad de la empresa FCC (Fomento de Construcciones y Contratas de Koplowitz). La inmersión de la terraza se puede ver desde la mencionada casa de El Maquillón, dado que la margen izquierda presenta una constante pérdida de altura respecto del río desde la casa del Conde de Cumbre Hermosa, a lo largo del paraje “Algarga”, hasta hundirse debajo de los depósitos visibles en la parada del autobús de la urbanización de El Soto (Figura 1). También desde esta posición se divisa sin esfuerzo el excepcional grosor de los depósitos aluviales de la margen derecha del Tajo al otro lado del puente (en la incorporación de la pista que viene de la citada gravera). Con un sellado de materiales horizontales, como corresponde a los depósitos fluviales normales, se fosiliza un gran paquete de conglomerados con claras indicaciones de colapso por fallo de la base. Los sedimentos gruesos fluviales muestran posiciones verticalizadas entre escalones horizontales. En cualquier caso las terrazas del Tajo en este tramo superan los 4 m de espesor, y, como se ha dicho más arriba, se encuentran duplicadas por la inmersión de las antiguas. Así en la Memoria que acompaña a la cartografía geológica del Magna

1/50.000 editada por el Instituto Geológico y Minero de España (hoja 584, Mondéjar) se llega a cifrar en 30 los metros de depósitos cuaternarios.

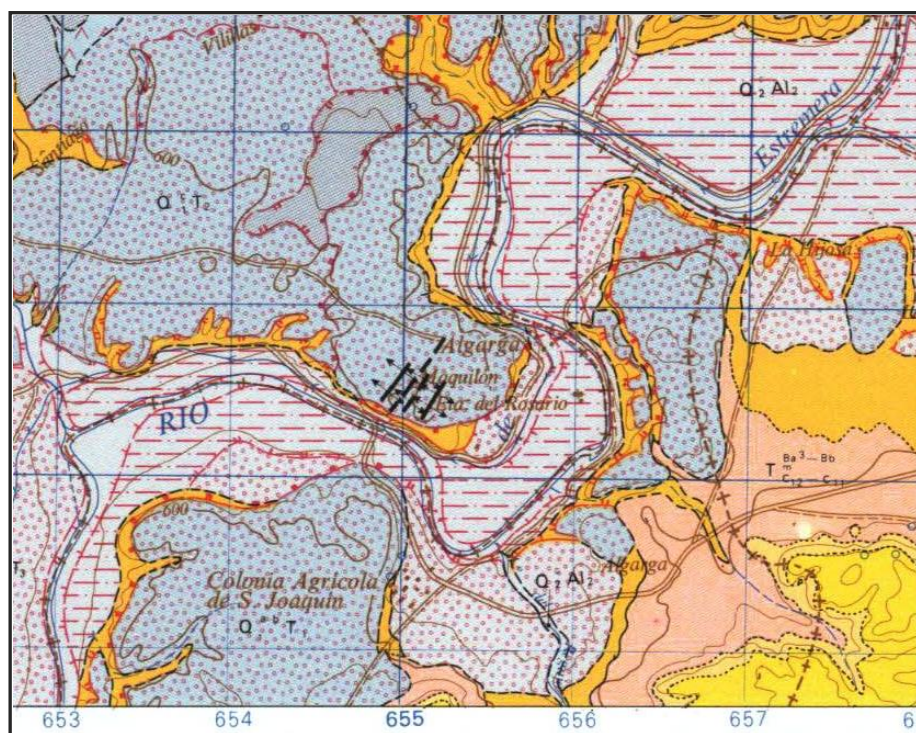


Fig. 2. Recorte del mapa geológico, hoja 584, Mondéjar



Fig. 3. Detalle de las terrazas deformadas del río Tajo próximo a Estremera (Madrid)

Esta extraña estructura en colapso puede interpretarse como producida por tectónica de falla. No obstante la aparente linealidad de los contactos, la propia instalación de la Central Nuclear exige la seguridad de que no haya movimientos tectónicos en el espacio aledaño, lo que se garantizó mediante el oportuno estudio tectónico previo a la construcción de la central. Podría, aunque fuera hipotéticamente, imaginarse un fallo en el estudio inicial, pero la realidad observada hasta el momento, no deja hueco a una sin duda calenturienta imaginación, falta de pruebas. En la

cartografía geológica oficial se interpreta correctamente la presencia de dos abombamientos antiformes en las gravas, arenas y limos más antiguos, anticlinales que enmarcan a la fosa colapsada intermedia (Figura 2). Se afirma de ellos, lo que para nuestro entender no está suficientemente descartado, que no pueden ser resultado de la halocinesis, dado que se trata de un área de cambio lateral de facies en el sustrato, donde los yesos dan paso a miembros margoyesíferos. Este argumento nos parece débil a la hora de explicar la realidad observada. Es más, casi resulta reversible: serían los cambios laterales, que en el área siguen una clara línea recta de contacto –luego están condicionados por la tectónica profunda del basamento, eso es innegable y lo sostienen los autores de la Memoria de la Hoja geológica-, serían pues los cambios laterales los que guiarían la entrada de agua que horadaría los potentes bancos de yeso. Resta entonces sólo como explicación, la pseudotectónica producida por el colapso de los estos masivos bancos de yesos que son especialmente profundos en estos parajes. Dado que los yesos persisten en la actualidad, por lo que no tendría que haberse interrumpido su acción colapsante, debemos pensar en unos procesos de pseudokarstificación antigua, compatibles con los resultados vistos, y ya no repetidos en época más reciente.

La importancia agrícola de las terrazas bajas del Tajo en esta posición queda atestiguada por el asentamiento de la Colonia Agrícola de San José, de la que hoy queda, además del nombre, aunque incluso con el adjetivo “agrícola” en absoluto desuso, un pequeño resto convertido en urbanización. Son las terrazas bajas las que, inusitadamente, se han visto aprovechadas por la euforia “chaletística” de los urbanitas que buscan a cualquier precio –pero siempre a cuál más barato- una segunda residencia en las inmediaciones de Madrid, próximos a una corriente fluvial, en un soto que pueda colmar sus ansias de “zonas verdes” tan explotadas por el ecologismo actual.

La nueva “urbanización” de El Soto-Río Llano se ha desarrollado en las tierras otrora agrícolas, pues, a pesar de la supuesta vuelta a la Naturaleza, son las más fáciles de construir, y, sobre todo, abastecer de agua, sin tener demasiado en cuenta qué hacer con las aguas residuales generadas.

Desde el punto de vista hidrológico, esta corriente Tajo posee en lugares inmediatos, dos estaciones de aforo: Almoguera, aguas arriba; y Fuentidueña de Tajo, aguas abajo. Lamentablemente los datos disponibles son bien pocos, reduciéndose al año hidrológico 2010-2011 (de octubre a septiembre, respectivamente), por lo que apenas puede decirse algo más que lo obvio: el Tajo está totalmente humanizado en este tramo, siendo su caudal regulado con plena intención. Los datos del año arrojan una aportación 288 hm³ en Almoguera y 308 hm³ en Fuentidueña (caudal medio de 9,15 m³/s y 9,78 m³/s respectivamente), como corresponde a un aumento de la superficie avenida. Los caudales medianos son ligeramente inferiores (7,67 y 8,48 en las citadas estaciones), lo que pone de manifiesto que la distribución estadística de caudales medios diarios no se acomoda a la normalidad, un hecho que, por otro lado, era de esperar, como tampoco lo son la distribución temporal de las precipitaciones ni el uso que el hombre hace de los recursos hídricos, ya sea con fines hidroeléctricos ya con fines agrícolas o de consumo.

Hasta tal punto es verdadera esta afirmación que, para el año estudiado, los caudales máximos, tanto diarios como instantáneos, se produjeron a mediados de Julio y finales de Junio en Almoguera, y finales de Julio en Fuentidueña de Tajo. Por el contrario, los mínimos estuvieron presentes en febrero y marzo, según las estaciones de medida (Figura 4).

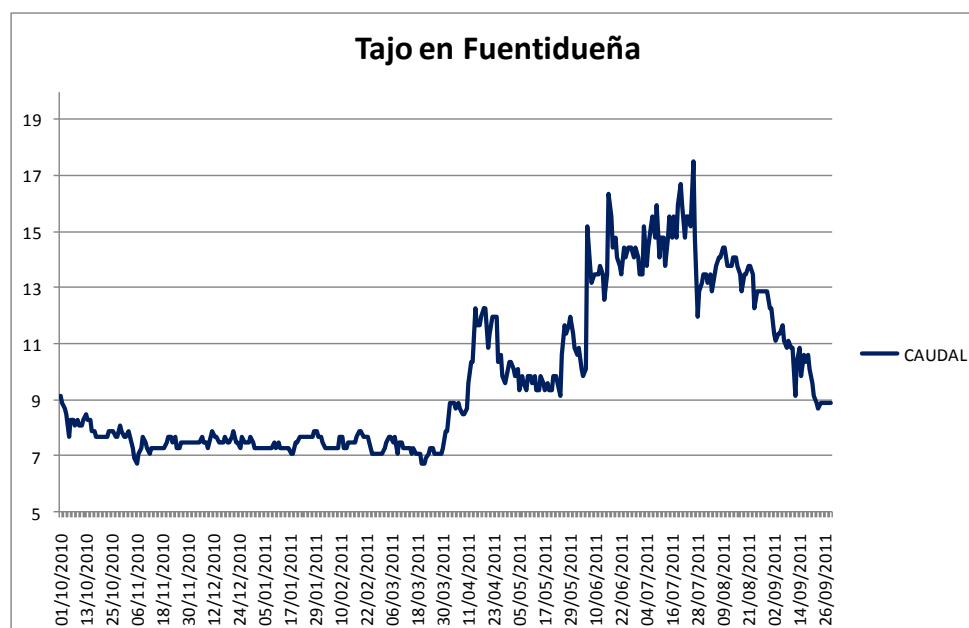


Fig. 4. Curva de caudales del año hidrológico 2010-2011

La regulación es tan importante que en el tramo desde Sacedón hasta aquí se suceden unos embalses a otros, enlazando casi la balsa al pie de una presa con el extremo de la cola de embalse aguas abajo. Recuérdese además que desde el embalse de Bolarque se toma el agua para el acueducto del Transvase Tajo-Segura. Estos caudales suelen desviarse a comienzos del año civil, aunque dependiendo de las disponibilidades de origen y las necesidades del destinatario.

Para el estudio del sellado de suelos se han seleccionado varias urbanizaciones construidas en la misma llanura de inundación del Río Tajo, lo que supone, evidentemente, un riesgo alto de inundación, sin que la normativa existente (Ley de Aguas, RD 1/2001; Planes urbanísticos municipales, etc.) haya impedido su construcción. Están construidas en ambos márgenes del río Tajo, a la derecha, Peña Rubia, perteneciente al municipio de Estremera (Madrid) y a la izquierda, El Soto-Río Llano, en el municipio de Illana (Guadalajara) (Fig. 5).

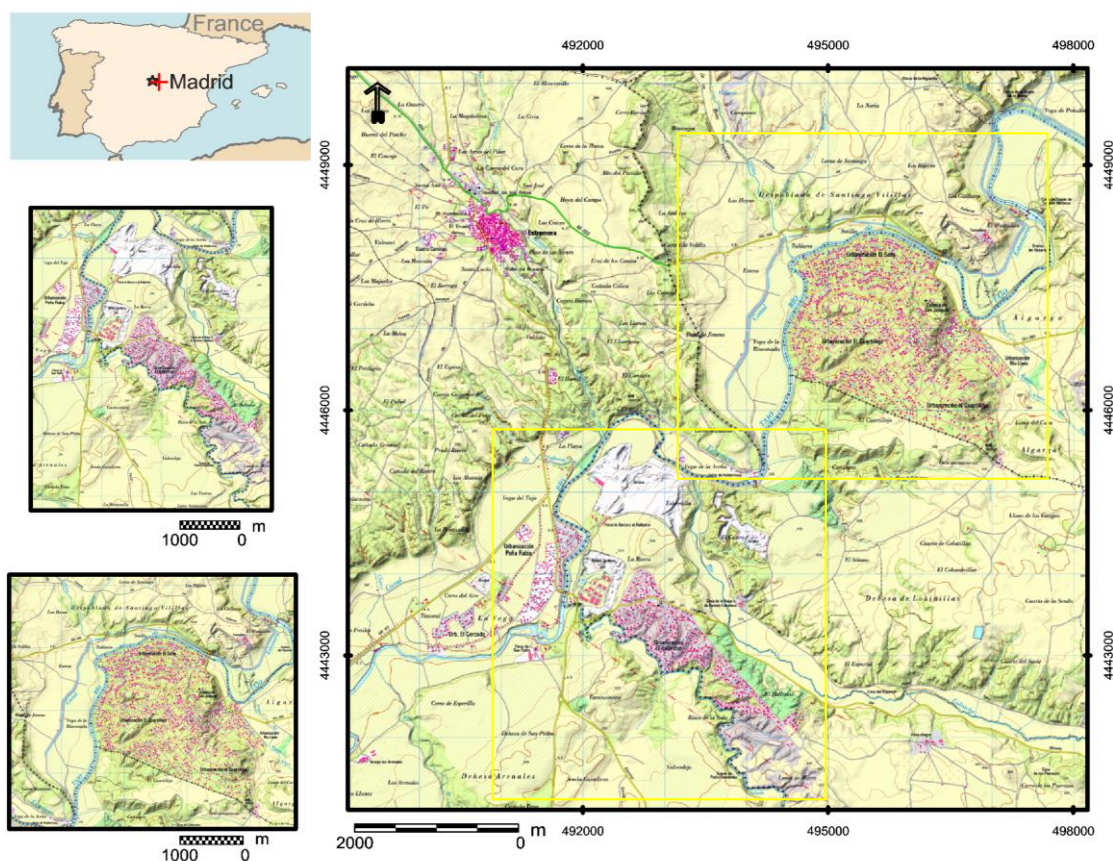


Fig. 5. Localización de las áreas de estudio en un mosaico de los mapas topográficos 1:25.000, 584-3 y 607-1.

Mediante el tratamiento de imágenes de satélite, fotografías aéreas, cartografía y trabajo de campo se evalúa la idoneidad o no del emplazamiento de estas urbanizaciones y se determina qué sectores son los que representan un mayor riesgo ambiental. Además, se destacará qué información temática se obtiene mediante el tratamiento visual y digital de las imágenes: usos y cubiertas del suelo, cambios multitemporales y cuantos aspectos sean relevantes en un estudio del territorio.

Como base para el análisis de las imágenes de satélite, es conveniente emplear toda la cartografía posible que haga referencia al medio físico y a la actividad antrópica. Para ello se ha seleccionado mapas geológico, de suelos y de uso de suelos. También se ha utilizado el visor de la sede electrónica del catastro.

Los materiales que constituyen el área sobre la que se asientan las urbanizaciones son depósitos aluviales cuaternarios compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas yesíferas, en su llanura aluvial y yesos (masivos grises y especulares) datados del mioceno en las primeras terrazas. Estos yesos en la margen derecha del río Tajo son explotados en diversas canteras. Los yesos aparecen también asociados a arcillas y margas verdes miocenas (Fig. 6).

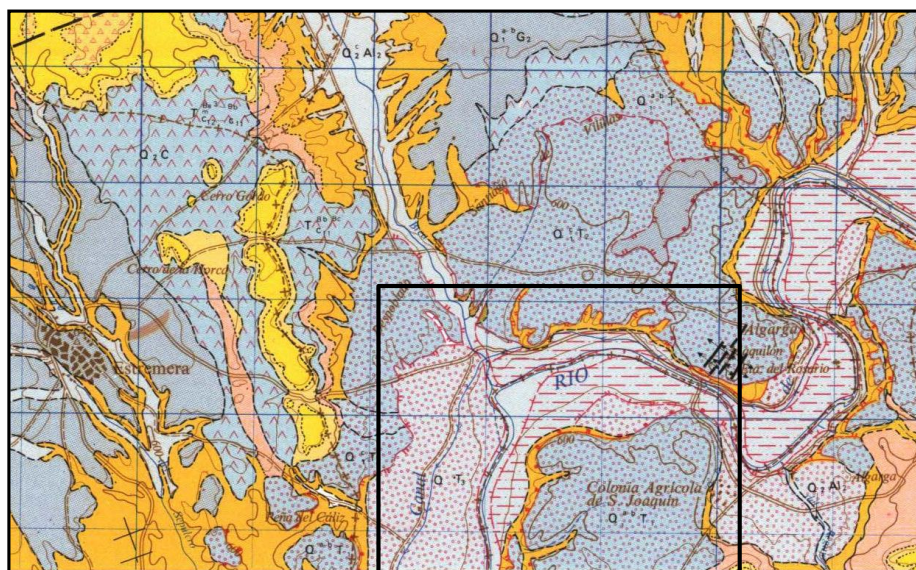


Fig. 6. Mapa geológico 1:50.000. Área de estudio.

No existen mapas de suelos con escala detallada del área de estudio, por lo que se ha seleccionado el mapa 1.250.000 de la provincia de Guadalajara (Guerra *et al.* 1970) y se ha adaptado a la clasificación WRBSR, FAO 2011.

En la llanura de inundación se desarrollan fluvisoles (color azul fuerte) y, en las primeras terrazas asociaciones de gipsisoles y leptosoles rénsicos, junto con regosoles cálcicos (azul claro y verde). Solo en algunas áreas más estables y antiguas han evolucionado a cambisoles calcáricos (amarillos). Estos suelos están sometidos a distintos usos: cultivos de regadío y secano, áreas urbanizadas y explotaciones mineras. También hay algunas manchas de vegetación natural (matorrales gipsícolas), pastizales y eriales.

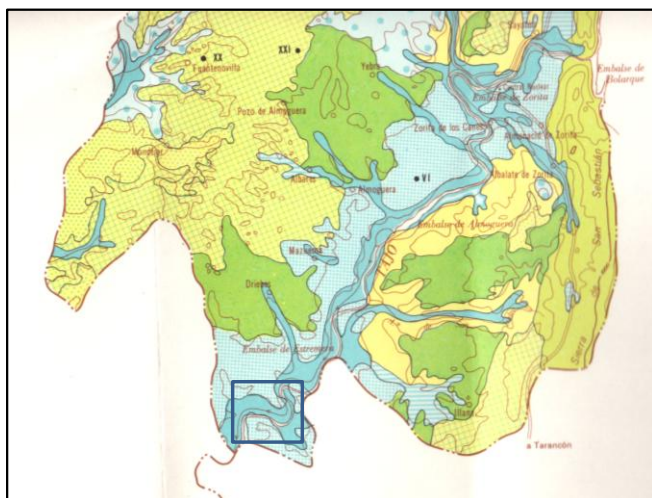


Fig. 7. Mapa de suelos 1:250.000 (Guerra *et al.* 1970). Área de estudio

El mapa de ocupación de suelos del SIOSE del IGN sintetiza estos usos (Fig. 8)

En color rojo las áreas urbanizadas. La mayor parte de la urbanización la han cartografiado con un uso de vegetación de pastizal. Este error es debido a que la mayoría de las parcelas están ocupadas por una vivienda individual con un extenso jardín por lo que la confusión, mediante un análisis puramente visual, es muy fácil ya que muchos de los jardines están cubiertos por césped o plantas ornamentales. La resolución espacial de los satélites empleados no permite una buena discriminación entre ambos tipos de uso. Por lo tanto, no es conveniente utilizar este mapa como apoyo para el análisis de las imágenes de satélite y, mucho menos, tiene fiabilidad para emplearlo en la realización de la matriz de confusión al establecer la fiabilidad de las clasificaciones digitales.



Fig. 8. Mapa de ocupación de suelos SIOSE (www.ign.es).

El visor de la sede electrónica del catastro como herramienta de aprendizaje activo geográfico

Entre los numerosos sitios web de productos cartográficos gratuitos se encuentra el de La Sede Electrónica del Catastro y su servidor de cartografía *on line*. Constituye una herramienta muy útil en el aprendizaje de métodos de aproximación al conocimiento de un territorio, que los estudiantes de Geografía deben de conocer y familiarizarse con su uso en varios sentidos:

Por un lado, ofrece un esquema sencillo, de la geometría de las áreas de poblamiento y su distribución en el área en cuestión. Es cierto que lo mismo valdría para ello la cartografía básica topográfica, (IGN) en la que se basa, pero la del Servidor catastral tiene la ventaja de que está ya despojado de la numerosísima simbología de información topográfica, geodésica, y planimetría varia, que, como no podía ser de otro modo, abigarra el mapa y dificulta, a los no expertos, la visión esquemática de la estructura territorial. Se trata por lo tanto de un proceso de esquematización cartográfica, ya realizado previamente y que se visualiza a golpe de clic de zoom.

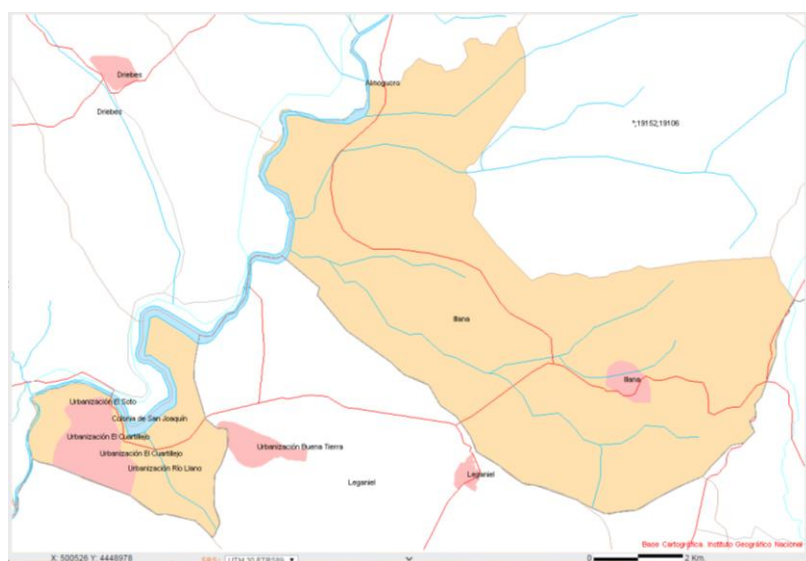


Fig 9 a. Croquis según esquematización del visor catastral

SIMBOLOGÍA		
RECINTOS	LÍNEAS	ATRIBUTOS
Parcelas rústicas	Límites administrativos	Polígono
Construcciones sobre rasante	Límite suelo urbano	Manzana
Construcciones bajo rasante	Manzana / Polígono	Parcela urbana
Solares y patios	Parcela	Parcela rústica
Jardines y zonas deportivas	Construcción/subparcela	Construcciones
Piscinas y estanques	Mobiliario urbano	Subparcelas
	Hidrografía	N° de policía
	Zona verde	

Fig. 9 b. Simbología de la cartografía catastral de gran escala

Esta fuente, permite ver los detalles públicos catastrales de las fincas rústicas y urbanas, como salida cartográfica de un registro público de propiedades y propietarios, en aquellas variables que no constituyan datos protegidos.

Sin entrar en los detalles catastrales, que es para lo que se crea y por lo que se mantiene este tipo de registro administrativo, puede verse en la “simbología”, como la aplicación de los criterios esquematización nos dibujan polígonos y líneas de gran utilidad para establecer el esqueleto básico del área de estudio.

Los polígonos coloreados, nos delimitan figuras calificadas en unos pocos usos. En ausencia de planeamiento específico, como creemos que es el caso del ejemplo, bien pudiera servir este dato para orientarnos sobre el uso normativo, o real, asumido por la legalidad, sea o no normativamente procedente. Estos polígonos se pueden delimitar, medir, cuantificar usos, y añadir todos los atributos que puedan ser conocidos por esta u otras fuentes, cargándose en el SIG diseñado para esta práctica.

Además de permitir el cambio de escala, con el espacio perfectamente georeferenciado, con cursor que muestra las coordenadas UTM, permite añadir capas como la PNOA.

Otra utilidad de este visor del Catastro, es que incorpora igualmente la base del SIGPAC, permitiendo más análisis del entramado parcelario, y comparar parcela agraria, con parcela catastral.

El núcleo rector municipal:

La geometría del núcleo rector del municipio, y el mosaico parcelario que le rodea, son perfectamente identificables. Sobre estas imágenes directamente, con diversas herramientas, o bien, y mejor, ya incorporados a un SIG podemos definir la cobertera humana, los usos y aprovechamiento, cuantificados, y de ahí establecer teorías sobre la dinámica territorial y aventurar los procesos que en este lugar están teniendo lugar.

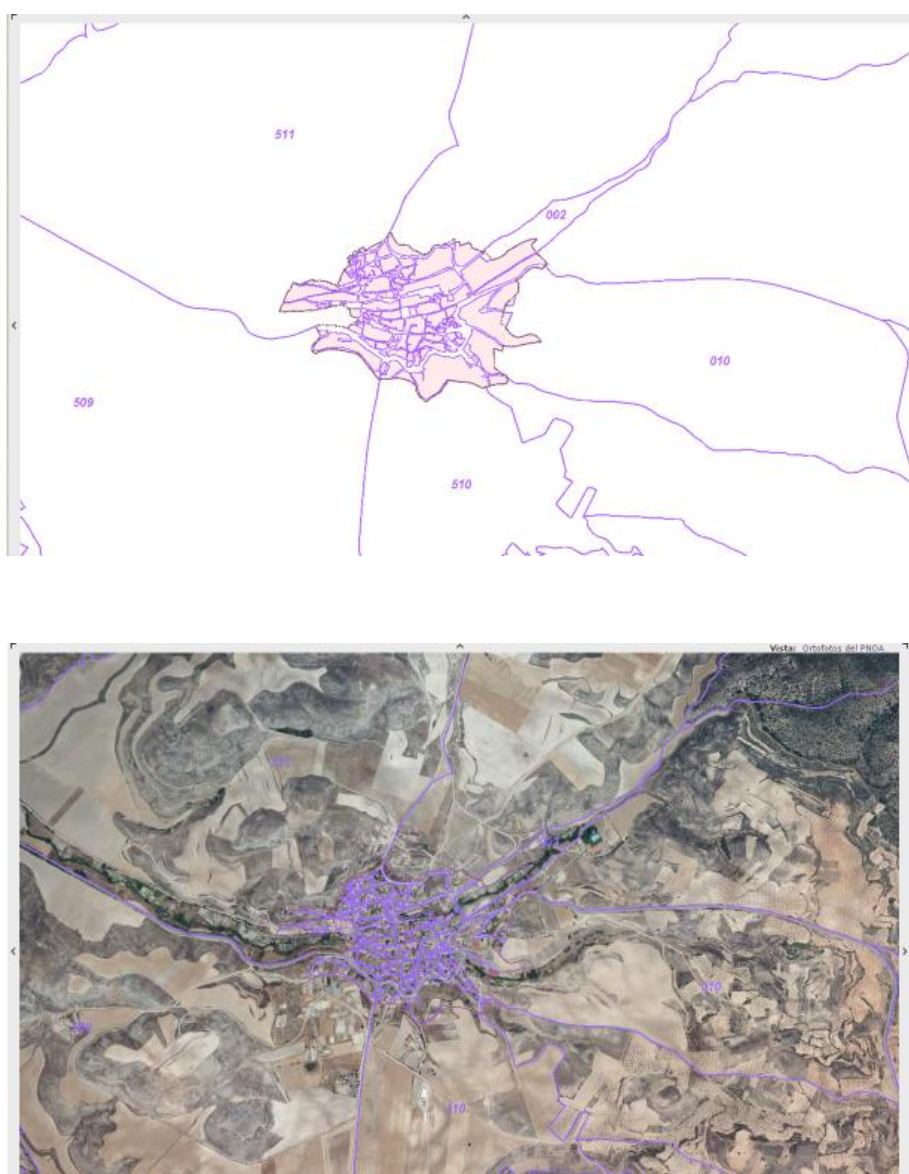


Fig. 10. Núcleo urbano de Illana

¿UBANIZACIONES-SOMBRA URBANA- POBLACIÓN ANTIGUA?

Guadalajara es una de las provincias que más poblaciones abandonadas tiene, tales como Bujalcayado, (Sigüenza), Fraguas, Hontanillas, Jocar, Villaescusa, etc. La mayoría de ellas, quedaron como entidades de población asimiladas, anexionadas a un término municipal que las incluye. Algunas de ellas han conocido asentamientos de población neorural, o han rehabilitado sus casas como en Matallana, del municipio de Campillo de Ranas.

Este caso de despoblación no parece ser el de Illana, a pesar de que a lo largo del siglo XX y principios de éste, su población se ha reducido a la mitad. En Illana, según el Nomenclator de Población (2012) el núcleo del municipio rector, parece compartir casi a partes iguales, los algo más de 800 habitantes, con otro espacio, alejado de éste, a orillas del Tajo.

A unos siete kilómetros entre parcelario agrario, del núcleo rector municipal vive la otra mitad de los habitantes, según la fuente citada. Se trata de una población antigua, tipo caserío, Algarga, perteneciente al municipio de Illana, como figuraba ya en el siglo XIX, por lo que no puede interpretarse como una población inicialmente abandonada como consecuencia del despoblamiento y recuperada por neoruralismo, ni por los efectos sobrevenidos del asentamiento a orilla del Tajo de alcarreño de nuevas urbanizaciones, sino de una entidad de población, que junto a la principal, conforma el municipio.

Efectivamente un conjunto de urbanizaciones, que podemos calificar, inicialmente a falta de comprobación con otras fuentes estadísticas, como sombra urbana, de la Región de Madrid, en un municipio rural, de otra Comunidad Autónoma. Esta huella o sombra urbana. Este conjunto adopta una morfología donde la pauta geométrica parece marcarla el curso del Río Tajo, y dos arroyos que envuelve las urbanizaciones y las delimitan por el norte y sur.

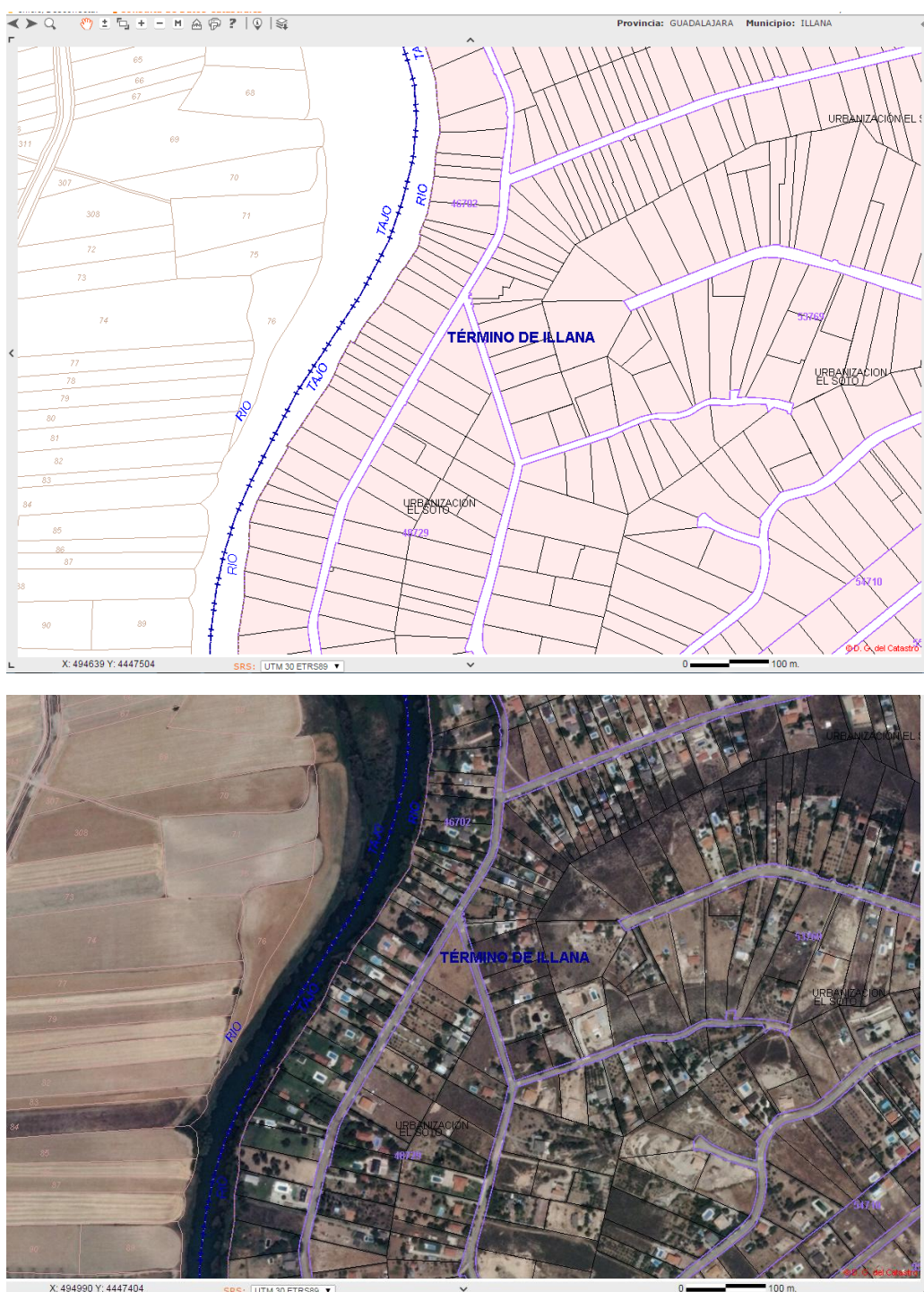


Fig. 11. Urbanizaciones margen izquierda del Tajo: ¿suburbio metropolitano – segunda residencia? En cualquier caso sombra urbana

Se trata de urbanizaciones (colonias) de una gran variedad de parcelario (desde unos 200 metros² hasta unos 7000 m²), (Fuente: ofertas en el idealista.com) como son El Cuartillejo (110 habitantes), Rio Llano,(37 hab.), El Soto (187) y Colonia San Joaquin, con 2 habitantes. Sombra urbana en la forma de un cierto “turismo rural residencial”, más que de un alejado suburbio de movimientos pendulares. Esto se confirma con los siguientes datos:

- i) 91 % de las edificación residencia es unifamiliar;

- ii) de 1518 solo 308 son viviendas principales
- iii) 1098 secundarias y 112 vacías (Datos municipales Cajaespaña 2012)

Con todo, el significado para el sellado de suelo es mas cualitativo que cuantitativo. Con menos de 12 habitantes Km², es un municipio poco poblado, en consonancia con el entorno alcarreño. Si bien el hecho de que su densidad sea menor al valor provincial, no es significativo, ya que el valor provincial está alterado por la zona mas impactada por Madrid (Corredor Madrid-Alcala Guadalajara) que eleva de forma irregular, el valor de la densidad provincial, sin que ello signifique un menor problema de áreas de depoblación frente a areras que consume gran espacio natural y, por consiguiente de sellado de suelo.

Si bien estas cuantas fuentes no son suficientes para determinar con rigor la dinámica territorial, y sobre todo, sus efectos en la huella ambiental y el sellado de suelo, por la relativa proximidad a Madrid, si son validadas para establecer la siguiente teoría:

1.- El impacto de Madrid se deja notar en la ocupación de un terreno agrario por urbanizaciones residenciales.

2.- Es posible que una menor exigencia normativa y vigilancia urbanística, en otra comunidad autónoma, haya permitido una aglomeración de urbanizaciones en un entorno, carente de protección. Dicho sea de paso, con algunas dudas solo lo lícito de las contrucciones, que por la cartografía parecen invadir la zona de Dominio Publico Hidráulico, así como otros problemas ambientales señalados.

3.- Los problemas municipales de diferentes órdenes, derivado de una población residente muy escasa, y numerosa población flotante, que generan espacios y urbanizaciones semivacios durante largos peridoso, y a los que hay que dotar de seguridad y servicios de una demanda muy diferente según peridoso de tiempo. Es decir que el pueblo tiene 800 habitantes residentes y pueden llegar a mas de 3000 en determinados momentos del año.

Por otro lado el Planemiento Urbanístico carece de Plan General Municipal (COACM), de forma que se dispone de Normas Subsidiarias de Planemaiento de 1984, con modificaciones en 1987, 1991, 1993, 1999.

Los 3 Planes Parciales, con sucesivas modificaciones instrumentaron la construcción de las urbanizaciones de la ribera derecha del Tajo:

- Pp 1 El Cuartillejo, 1987, con una modificacion en 1995.
- Pp 2 El Soto, 1988, con modificaciones en 2003 y 2004.
- Pp 3 Rio Llano, 1989 y modificación en 1995.

El ajuste a planeamiento, significa la legitimación normativa, si es que no aparecen conflictos en las afecciones de suelo, pero, no significa necesariamente que su valoración ambiental tenga que ser positiva. Por lo que respecta a su peso en huella ambiental, y sobre todo en lo que a sellado de suelo se refiere, puede aventurarse que existe, pero su valoración mas precisa, solo es posible, con la aplicación de la

metodología que se está ensayando en el Proyecto CSO2012-34785, para grandes escalas, y que tabula, niveles de sellado, en función del tipo de edificación de las manzanas y parcelas.

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS E IMÁGENES DE SATÉLITE

Antes de iniciar el estudio de las imágenes de satélite actuales es interesante comparar mediante fotografías aéreas el desarrollo de la zona. Para ello se han seleccionado dos fotografías aéreas de mediados del siglo veinte y de los años ochenta y la imagen disponible en Google Earth© del año 2011.

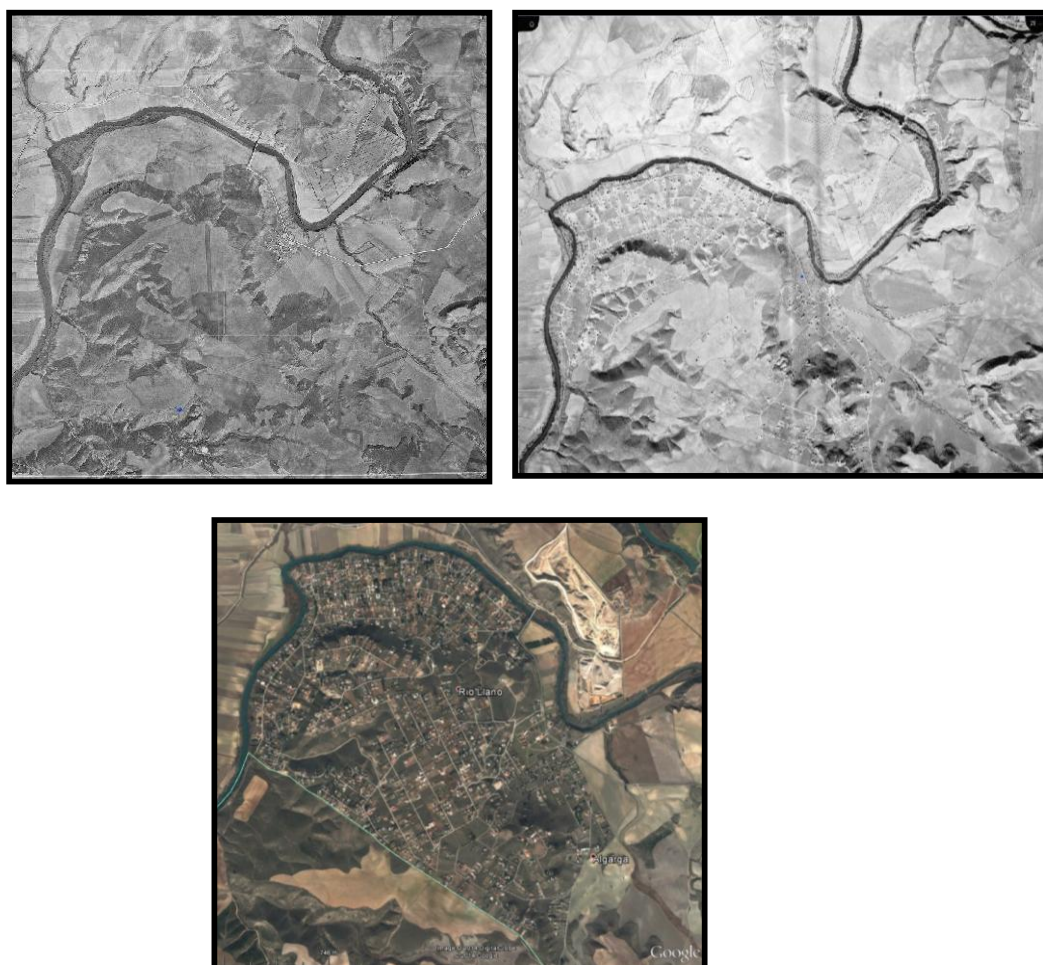


Fig. 12. Fotografías aéreas del vuelo americano del 1957 al 1965(www.ign.es), del vuelo nacional de 1980 a 1986 (www.ign.es) y una imagen de satélite (Digital Globe) del 2/10/2011(www.google.earth).

Al comparar estas fuentes de información se puede observar como en los años 60 aún no se había iniciado la construcción de la urbanización. Sin embargo, en los años ochenta ya se habían urbanizado las parcelas más próximas al río, en la llanura de inundación y primera terraza. La estructura sigue el meandro del Tago, parcelándose

incluso algunas de las áreas más elevadas, aunque aún no se habían construido muchas viviendas ni se había desarrollado la vegetación de los jardines privados. Por el contrario en el año 2011, la urbanización muestra el aspecto actual con un alto número de parcelas ocupadas con viviendas unifamiliares, la mayoría con piscinas y desarrollo de plantas ornamentales en los jardines. Se ocupan incluso los sectores más elevados, aunque se ve como algunas parcelas no están urbanizadas e, incluso en algunos enclaves, se ven suelos muy erosionados.

Análisis visual de las imágenes de satélite

Se dispone de fotografías aéreas desde los años setenta del pasado siglo y las imágenes de los satélites mencionados anteriormente. Aunque la alta resolución espacial de las fotografías aéreas convencionales invita a utilizarlas para analizar el sellado del suelo, la carencia de datos multiespectrales y su bajísima resolución temporal, casi las relega a un segundo plano a la hora de elaborar cartografía temática, si bien siguen siendo imprescindibles para estudios geomorfológicos, de vegetación a pequeña escala y como fuente de consulta o validación de la cartografía semiautomática realizada sobre épocas pasadas.

Por ello, aquí se analizan las bandas o canales espectrales que facilitan la detección y medida del sellado a partir de imágenes de satélite. Antes, destacar que la identificación visual de los suelos sellados está muy condicionada por la resolución espacial y espectral del sensor utilizado. Para los procesos recientes se dispone de imágenes de alta resolución espacial desde finales de 1999, gracias al lanzamiento del satélite Ikonos (con 1 y 4 m), pero para abordar estudios multitemporales o retrospectivos del territorio se debe recurrir a satélites de resolución espacial media, que aventajan a aquéllos por su mayor resolución espectral.

En primer lugar se contrastan dos imágenes Landsat (con 30 metros de resolución espacial) que difieren 30 años, entre 1984 y 2013 (Figs. 13 y 14). En la primera, casi cualquier combinación de bandas o información visual de bandas independientes, dificulta la localización de cualquier poblamiento, bien concentrado (aquí el núcleo rural de Estremera) o disperso, a modo de urbanizaciones con viviendas unifamiliares y amplios espacios verdes, construidas junto al tramo alto del río Tajo (Río Llano, Peña Rubia, etc.). No obstante, la imagen en *color natural* sí permite determinar el entramado urbano de las urbanizaciones incipientes junto al río Tajo, lo que señala la larga trayectoria del efecto frontera entre Comunidades y provincias con valor del suelo muy dispar (Madrid y Guadalajara, en este caso).

Llama la atención la escasa utilidad de la mayoría de combinaciones de bandas del satélite Landsat para localizar el sellado que sí han dado buenos resultados en otros ámbitos bastante próximos de Madrid y Guadalajara. Habitualmente el uso de los canales espectrales correspondientes al azul del visible e infrarrojos medios permite destacar en las imágenes los suelos sellados por urbanismo, debido a la baja humedad y

alta reflectividad de los materiales artificiales (García y Pérez, 2007, 2011, 2013 y 2014).

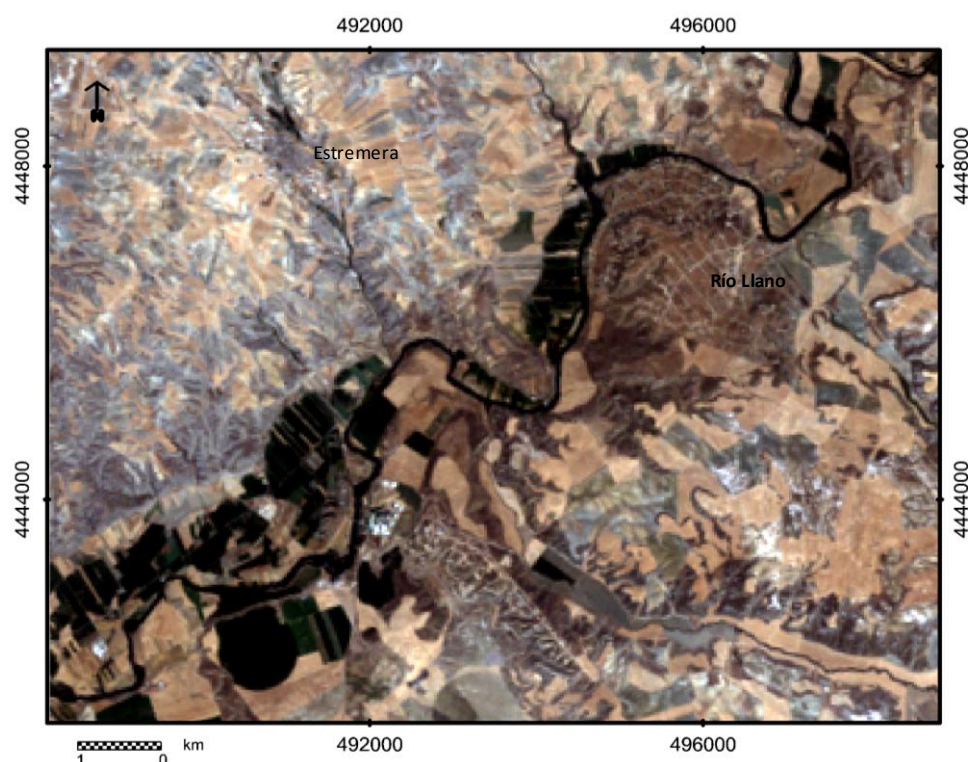


Fig. 13. Imagen Landsat 5-TM en color natural de 18-08-1984

Respecto a la imagen más reciente y aunque el satélite Landsat 8 duplica la resolución radiométrica (de 8 a 16 bits), con una notable mejora en la calidad visual de la imagen sigue teniendo una resolución espacial de 30 metros, que resulta por sí sola inadecuada para realizar una cartografía de sellado y coberturas del suelo. Por tanto, para mejorar el detalle de la imagen de 2013 se ha mezclado la imagen multispectral con la pancromática del satélite Spot 5 (con 2,5 m de resolución espacial), Figs. 13 y 14. En ella, se advierte una mayor nitidez en la imagen mezclada, pero debe tenerse en cuenta que la información espectral se modifica sensiblemente. Este proceso no ha sido posible realizarse con la imagen de 1984, pues no se dispone de imagen Spot de fecha similar.

La fig. 14 muestra fotografías realizadas *in situ* de las urbanizaciones del Soto-Río Llano y Peña Rubia en la que se advierte la proximidad de las edificaciones al cauce del río Tajo, parte de ellas construidas sobre su llanura de inundación. La imagen de mezcla entre la banda 7 del Landsat 8 y la pancromática del Spot 5 permite cartografiar con mayor precisión los sectores de las urbanizaciones mencionadas con mayor riesgo de inundaciones. También destacan en tonos muy claros junto al río las graveras y en tonos muy oscuros y formas geométricas los cultivos en regadío, ambos usos tradicionales de las llanuras de inundación y primeras terrazas de los ríos.

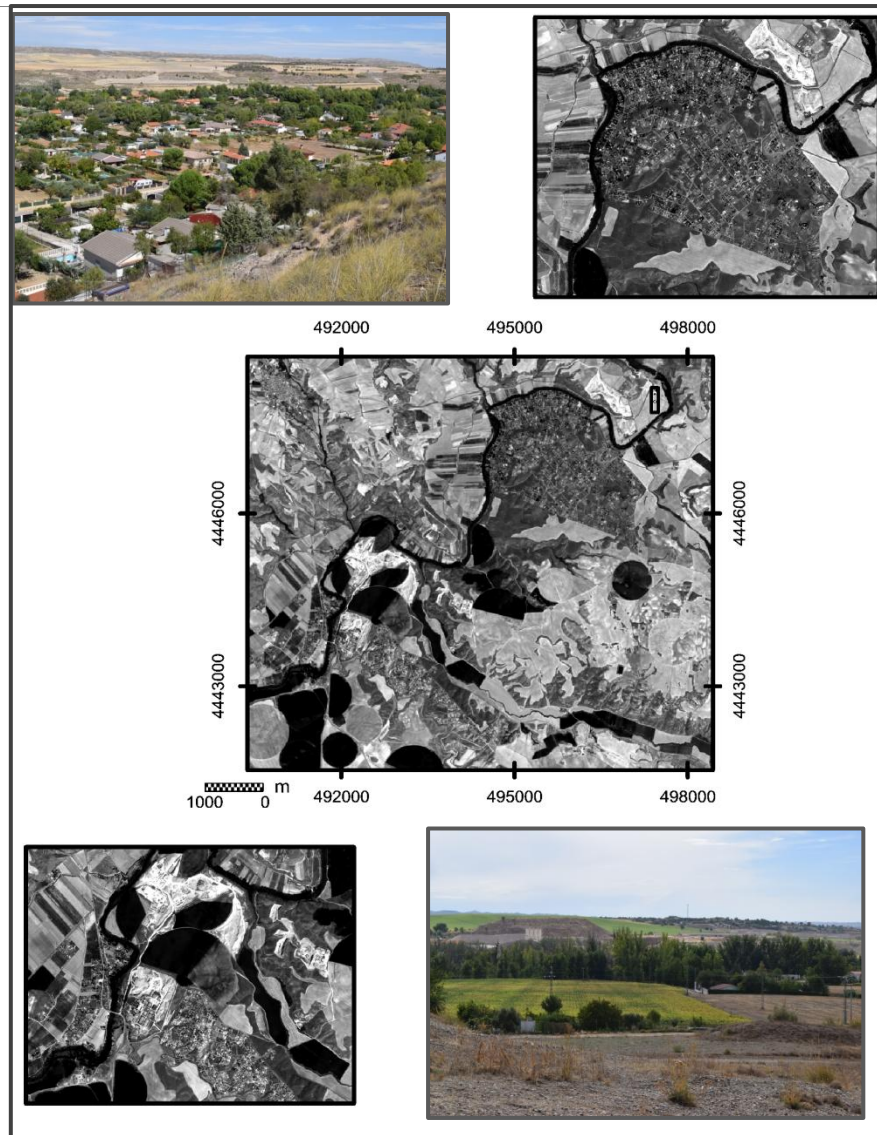


Fig. 14. Imagen Landsat 8 en IRmedio (banda 7) de 16-jun-2013 mezclada con la banda pancromática del Spot 5 de 9-ago-2013

En la combinación 6-5-4 (R-V-A) de la imagen Landsat 8 destaca la vegetación de los cultivos en regadío, de ribera, parques urbanos y parcelas unifamiliares con amplios espacios verdes en tonos de rojo, más o menos intenso en función de su mayor actividad clorofílica y densidad de cobertura del suelo. Por el contrario, sobresalen en tonos muy claros, los suelos más secos y desnudos, como las graveras, canteras, parcelas en barbecho y caminos sin asfaltar. En la imagen original destaca la urbanización junto al río Tajo con amplios espacios verdes y abundante vegetación de ribera. En la imagen mezclada y con mayor resolución espacial ya puede determinarse el tamaño de las parcelas, su proximidad al río y el viario de la urbanización.

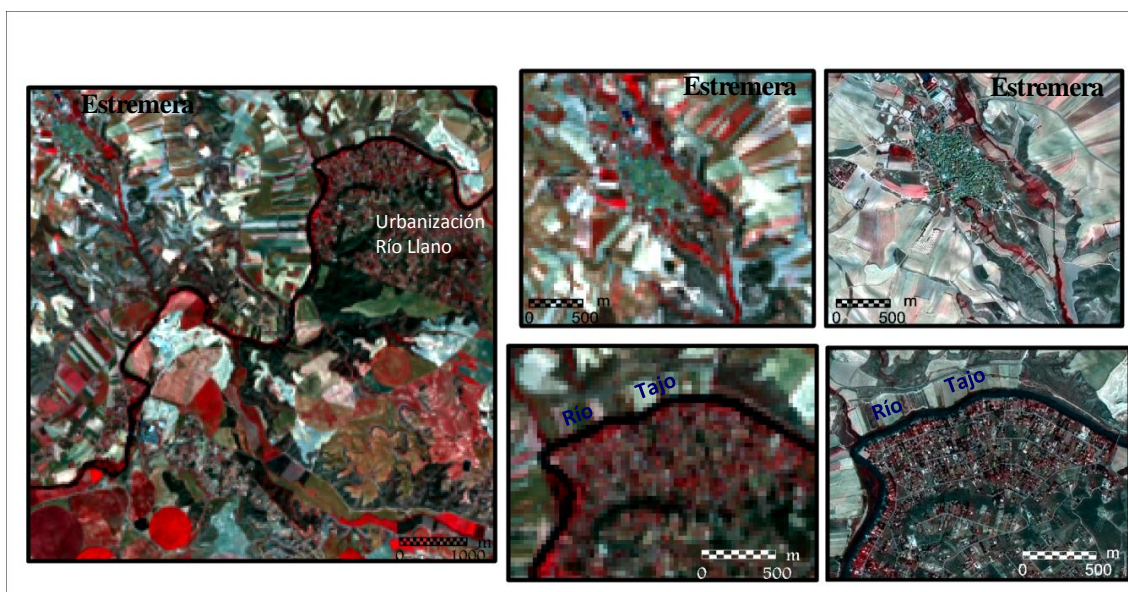


Fig. 15. Imagen Landsat 8 de 16-06-2013, combinaciones 6-5-4 (R-V-A). Detalle de dos poblamientos, con la imagen original y mezclada con la banda pancromática de Spot 5.

Análisis digital de las imágenes de satélite

Como se ha indicado en el capítulo de Material y Métodos, las imágenes de satélite se han sometido a una serie de mejoras con el fin de poderlas visualizar mejor y obtener mayor información. Además se han analizado los valores digitales de las escenas mediante la realización de perfiles espectrales, espaciales y superficiales, se ha realizado una imagen con los cambios acaecidos en 30 años y se ha hecho una clasificación temática.

I) Mejoras Espaciales

Entre las mejoras espaciales para detectar las superficies realmente selladas en urbanizaciones unifamiliares de amplio parcelario hemos seleccionado dos filtros de convolución, *3x3 summary* y *Sharpen* o afilado (Fig. 16). Con el primero se puede separar mejor los elementos lineales, pues quedan mal representados en las imágenes originales. Con este filtro, al sumar la respuesta digital cada 9 píxeles (3x3), se obtiene mejor representación espacial de la vegetación de ribera y de las superficies ajardinadas de la urbanización.

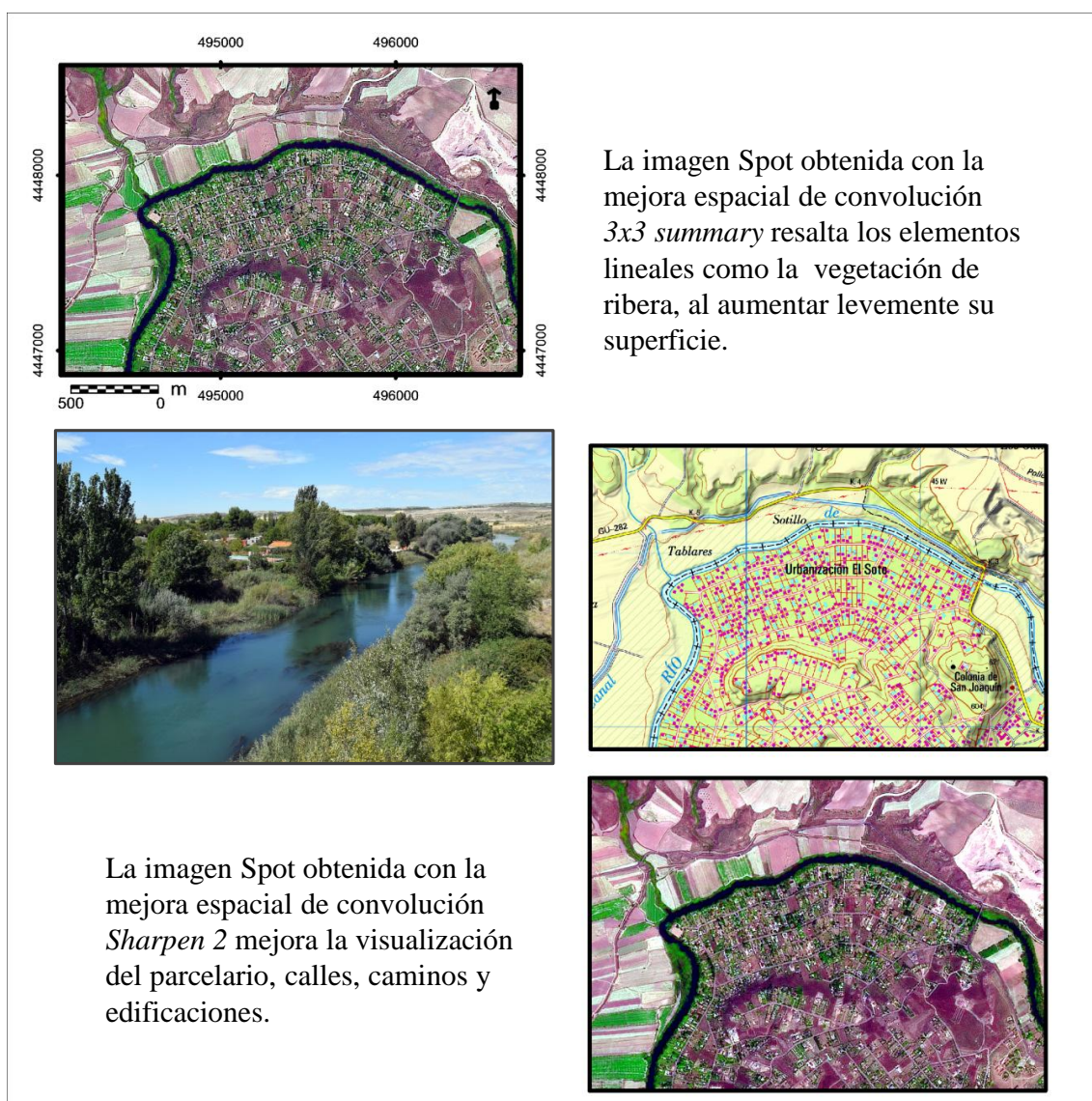


Fig. 16. Filtros espaciales para destacar la vegetación de ribera y el sellado discontinuo

Con el filtro *Sharpen* o afilado se obtiene una imagen en la que se acentúan los contrastes y cambios de tonalidades, facilitando la identificación de los límites de parcelas, trazado de caminos secundarios y viviendas unifamiliares, que con frecuencia quedan enmascaradas en las imágenes entre el terreno ajardinado colindante, sin impermeabilizar. En la Fig. 16 además se muestra un detalle del mapa topográfico y fotografía convencional de la urbanización El Soto (en Río Llano, Illana, Guadalajara), edificada sobre la llanura de inundación del Río Tajo y su primera terraza por la margen izquierda, con el consiguiente riesgo de inundación que ese emplazamiento conlleva.

II) Mejoras Radiométricas

Las mejoras radiométricas intentan mejorar la visualización de la imagen de satélite utilizando todo el rango de grises que permiten los sensores, normalmente 256. La mayoría de las imágenes tienen un rango mucho más limitado de números digitales, por lo que la operación más sencilla consiste en expandir estos números hasta los 256. Para ello se relacionan los números digitales de la imagen (ND) con los números visuales (NV) del ordenador utilizando una matriz numérica CLUT (Color Look Up Table).

Las dos operaciones más comunes son la expansión lineal del histograma y la ecualización del mismo. Aquí se ha seleccionado la ecualización ya que permite un mejor contraste. En esta operación el tono de gris se asigna no solo por el valor digital del pixel sino también por la distribución de frecuencias de los ND ortogonales, de forma que el NV asignado a cada ND esté en proporción con su valor y frecuencia

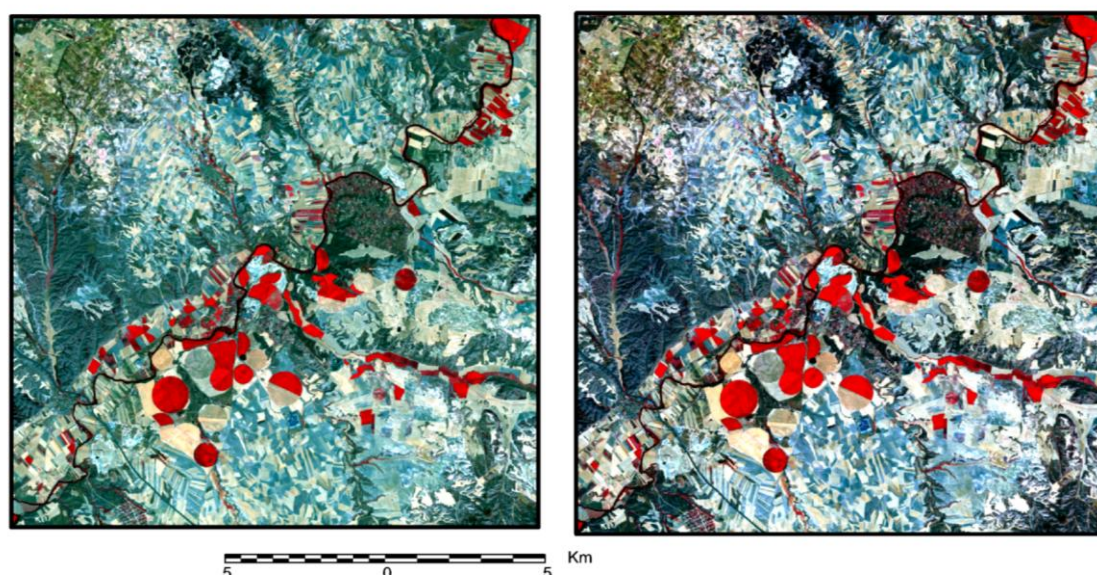


Fig. 17. Imagen SPOT 321 (R-V-A) sin modificar el histograma y con histograma ecualizado

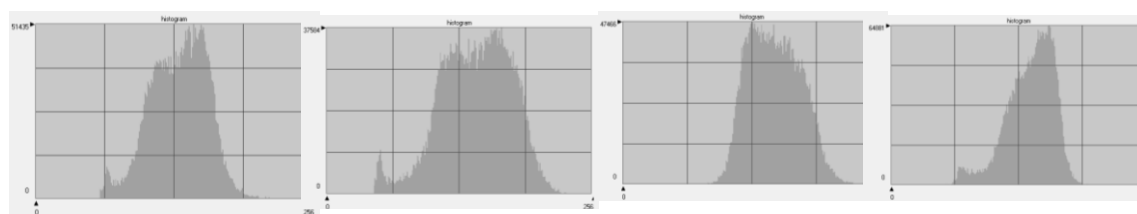


Fig. 18. Histogramas de las cuatro bandas del satélite SPOT (V-R-IRc-IRm)

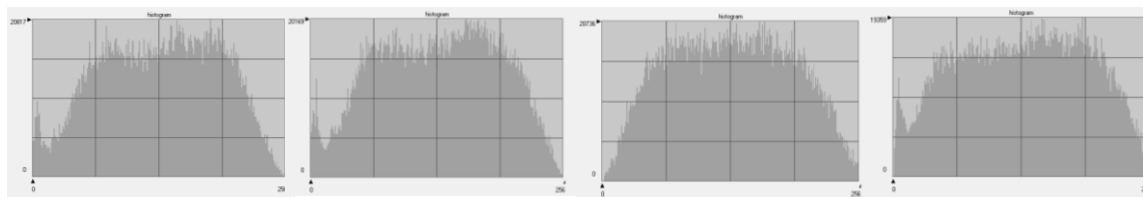


Fig. 19. Histogramas ecualizados de las cuatro bandas del satélite SPOT (V-R-IRc-IRm)

En estas figuras se puede observar como al ecualizar el histograma se le proporciona un mejor contraste a la imagen. Esto es debido a que en los histogramas ecualizados los valores abarcan los 256 tonos de grises. Pero la modificación del histograma conlleva la modificación de todos los estadísticos (tabla 2) por lo que los valores de los píxeles quedan modificados, lo que hay que tener en cuenta si se utiliza esta nueva imagen para hacer clasificaciones, etc.

Estadísticos	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Mínimo	58 0	45 0	64 1	44 1
Máximo	246 255	248 255	240 255	219 255
Media	131,5 127,5	142,8 127,5	149,7 127,7	138,5 127,5
Mediana	134 130	145 130	148 128	142 130
Moda	145 179	168 157	127 156	158 188
Desviación st.	26,3 59,5	34,5 60,7	25,6 59,9	23,9 63,8

Tabla 2. Estadísticos básicos de la imagen sin modificar y de la imagen ecualizada del satélite SPOT. En rojo los valores de la imagen ecualizada

III) Mejoras Espectrales

Las mejoras espectrales se basan en combinar distintas porciones del espectro electromagnético mediante mezcla de canales u operaciones matemáticas entre ellos, ya que al ser estar formada cada imagen por una matriz, se pueden realizar sobre ella todo tipo de transformaciones y operaciones matemáticas.

Entre las mejoras espectrales las que han resultado más útiles para el estudio propuesto están: componentes principales, tasselete cap, transformación IHS a RGB, transformación RGB a IHS.

a) El análisis factorial en *Componentes Principales* se basa en resumir un gran número de variables en un grupo más pequeño sin perder apenas información, teniendo en cuenta la matriz de varianza. En Teledetección las variables van a ser las distintas bandas del sensor y mediante este análisis se va a obtener una nueva imagen en la que los primeros componentes van a recoger casi toda la variabilidad. A estos componentes se le pueden asignar los tres cañones de color de forma que tengamos la información de todas las bandas que tienen alta correlación, en una sola imagen.

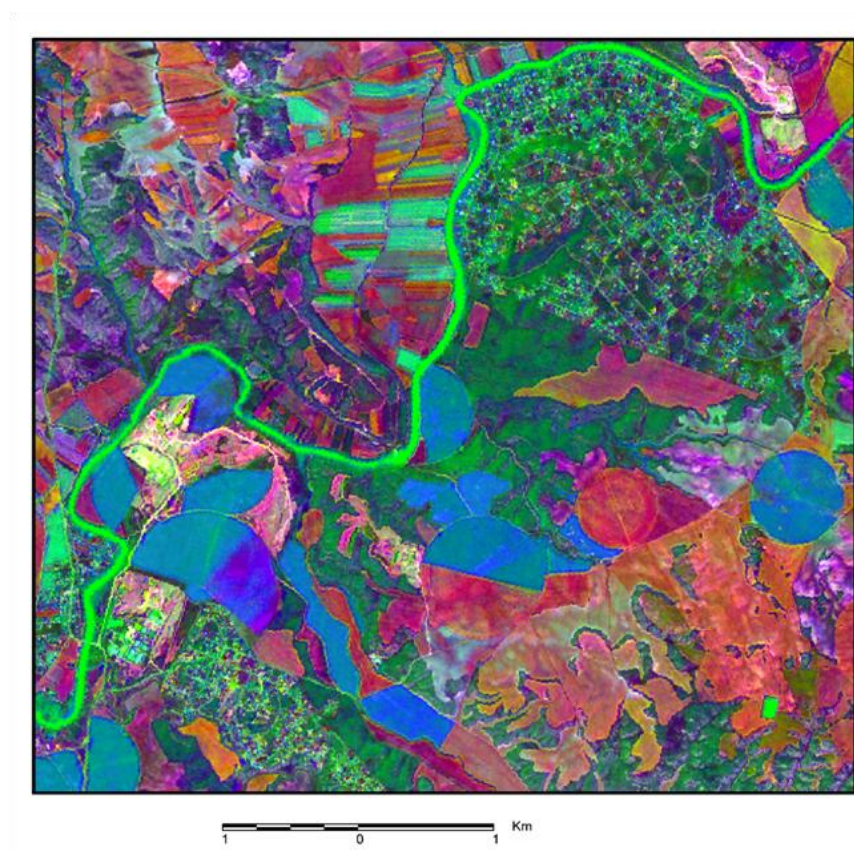


Fig. 20. Componentes principales: cuatro componentes SPOT 134 (R-V-A)

Esta imagen se ha obtenido correlacionando todas las bandas del satélite Spot y asignando a los componentes 1 3 y 4 los colores rojo, verde y azul respectivamente. Todas las estructuras lineales se perfilan muy bien en esta imagen. Se puede observar como las tres urbanizaciones analizadas se definen claramente en tonos verdes, distinguiéndose perfectamente el entramado de las calles y aquellas áreas con más vegetación (tonalidades verdes oscuras más homogéneas). El perfil del río queda perfectamente definido por la vegetación de ribera en tonos verdes intensos, frente a los tonos azules y rojos de los *pivots* de regadío (con vegetación y sin ella). También se perfilan bien las parcelas de cultivos de secano.

Este mismo análisis factorial se ha hecho con las seis bandas (todas menos la banda térmica) del satélite Landsat 8 y con la imagen de Landsat 5 con el fin de compara las imágenes obtenidas en las dos fechas, cuando la urbanización estaba finalizada y en sus primeras fases de construcción para comprobar si este tratamiento es realmente útil para estudios multitemporales.

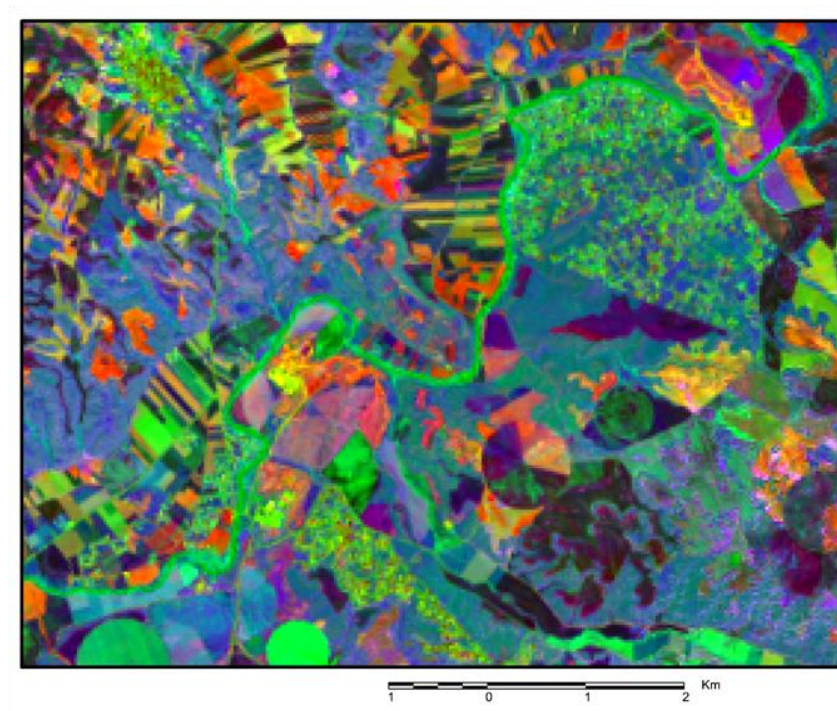


Fig. 21. Imagen Landsat 8 de 6 componentes principales, combinación 1-3-4 (R-V-A)

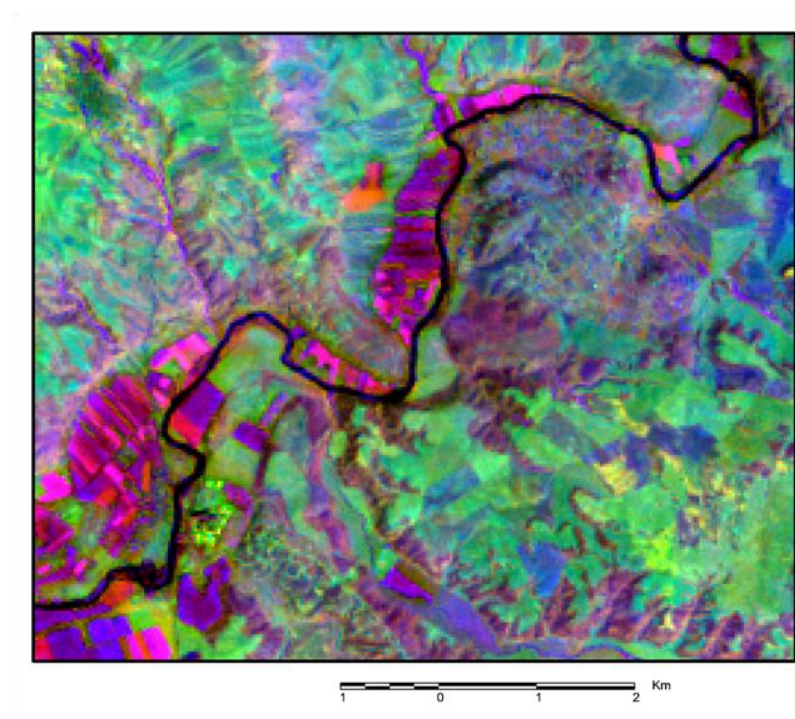


Fig. 22. Imagen Landsat 8 de 6 componentes principales, combinación 516 (R-V-A)

En ambas imágenes resalta bien el entramado de las calles y el mosaico que constituyen la intercalación de casas y jardines, si bien la mejor definición y tecnología más precisa del Landsat 8 (imagen de 2013) permite una mejor delimitación de ellas frente a la imagen del Landsat 5 (imagen de 1984) distinguiendo las parcelas con casa y

jardín de aquellos sectores de la urbanización que tienen más arbolado. También en la imagen más moderna se diferencian bien las otras urbanizaciones y el núcleo urbano de Estremera. Por el contrario, esta imagen no es muy buena para discriminar otras cubiertas del suelo: eriales, cultivos de secano, etc., y solo los cultivos de regadío con estructura circular se distinguen por su forma geométrica. En la imagen de 1984 se ve como, aunque ya se había realizado la parcelación de las calles, apenas se habían construido viviendas.

b) *Tasseled Cap*. Esta función consiste en reducir las bandas del sensor a tres nuevas bandas que representan el brillo o albedo (reflectividad de todas las bandas), el verdor (relación entre canales visibles e infrarrojo próximo) y la humedad (considerando el infrarrojo medio).

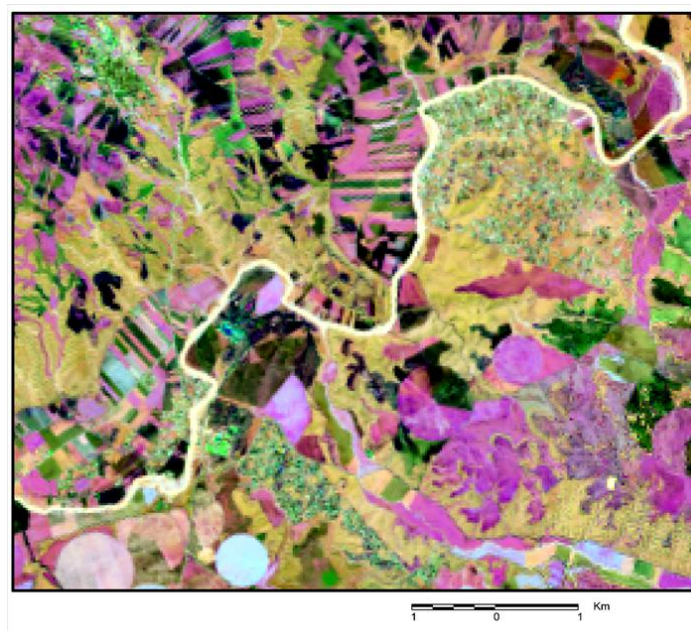


Fig. 23. Tasseled Cap, combinación 543 en la imagen Landsat de 2013

En esta imagen las urbanizaciones destacan en tonos verdosos (suelos sellados) con una textura gruesa salpicados por tonos amarillos (suelos sin sellar). El núcleo urbano de Estremera destaca en un tono verde más intenso y más homogéneo puesto que apenas existen parcelas con vegetación intercaladas con los edificios, ya que el sellado es mucho más continuo.

En la figura 24 la delimitación de la urbanización es más confusa y se confunde con parcelas sin sellar al otro lado del río. Por tanto, esta mejora no resulta demasiado adecuada cuando aún la urbanización está sin apenas construir. Sin embargo, si es útil para discriminar los sedimentos yesíferos de la margen derecha del río en tonos verde intenso y delimitar el curso de agua con su vegetación de ribera en tonos azulados.

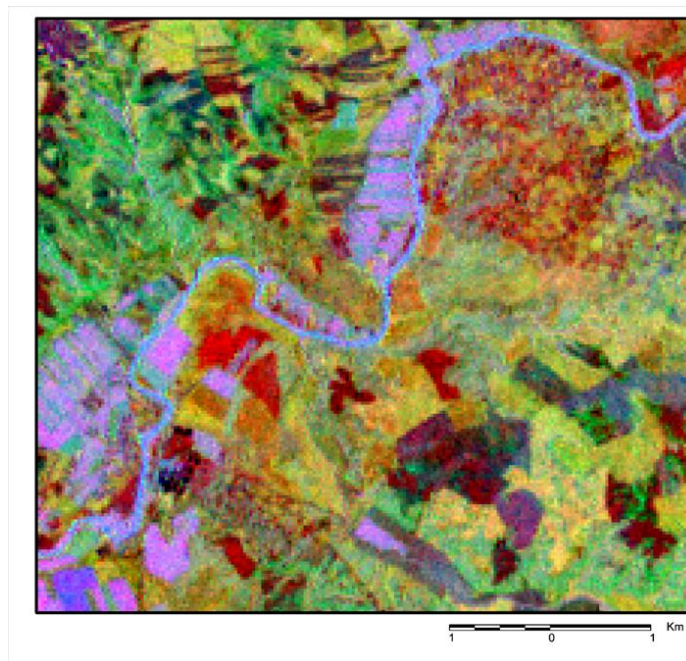


Fig. 24. Tasseled Cap, combinación 643 en la imagen Landsat de 1984

c) Transformación RGB a IHS

Se basa en la transformación de los colores primarios: Rojo, Verde y Azul en propiedades del color: Intensidad (brillo), Hue (tono o color) y Saturación (pureza de color) de forma que se pueda obtener una imagen con mayor contraste.

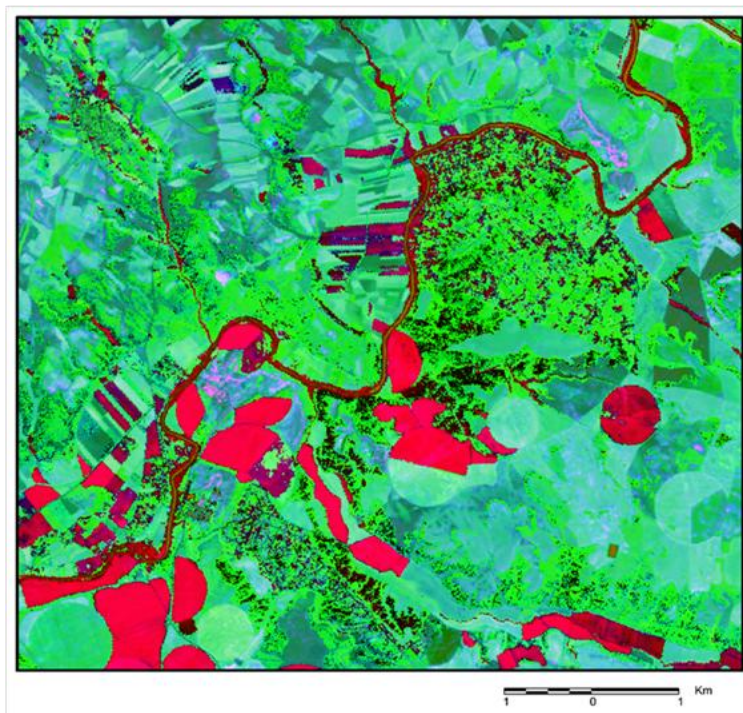


Fig. 25. Imagen SPOT 5 (3-2-1, R-V-A) originada por transformación de RGB a IHS

En esta transformación resaltan en color rojo las parcelas de regadío con cultivos y la vegetación de ribera con alta actividad clorofílica. Los suelos en barbecho o desnudos tienen tonos azulados muy claros. En verde aparecen las urbanizaciones y otras cubiertas con poca vegetación, por lo que solo es posible discriminar los suelos sellados por el mosaico de tonos verdes entremezclados con negros que crean una textura muy irregular (Fig. 25).

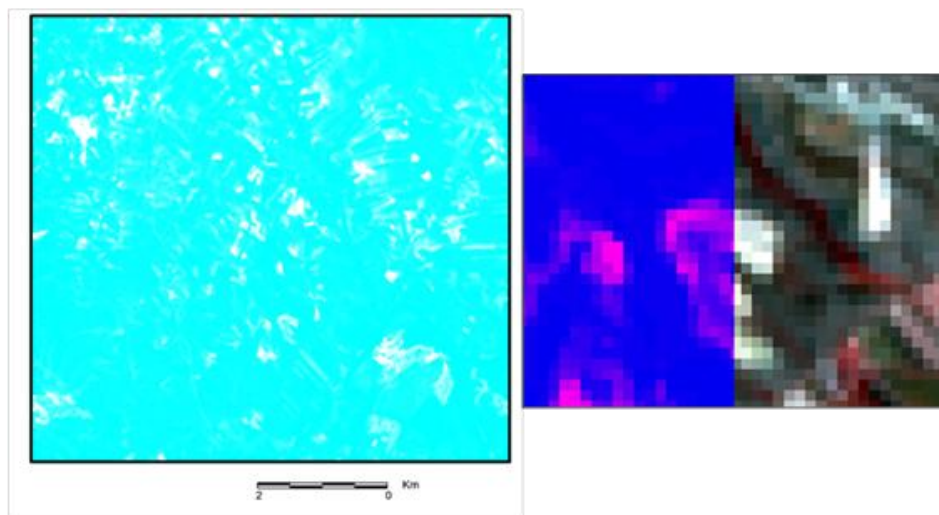


Fig. 26. RGB a IHS y detalle de *Swipe* Landsat 8 de 2013

La transformación RGB a IHS en el sensor Landsat 8, con menor resolución espacial que el Spot no es útil para distinguir áreas edificadas. Sin embargo sí permite resaltar parcelas removidas o con suelo desnudo, como se puede ver con más detalle al superponer a la imagen original (mezcla de las bandas 432) la imagen transformada. Esta superposición se efectúa mediante la herramienta *Swipe* del programa ERDAS Imagine-2013. Las manchas blancas de la imagen original aparecen en morado en la transformada. Las demás cubiertas no pueden ser diferenciadas, ni siquiera se pueden distinguir los suelos urbanizados de aquellos que están cultivados ya que todos aparecen en tonos azules (Fig. 26).

d) *Transformación IHS a RGB*: es la operación contraria a la anterior. Las propiedades de color, Intensidad, Hue y Saturación, se transforman en los colores primarios, Rojo, Verde y Azul.

En la figura 27 se distinguen muy bien las urbanizaciones por la textura que muestran debido a la distribución de las calles. Sin embargo, los colores pueden dar lugar a equívocos ya que, si bien todas ellas aparecen en tonos morados, esto es debido más a la vegetación que presentan que a la urbanización de las mismas. Así, si observamos el núcleo de Estremera vemos que muestra tonalidades más azules, igual que los suelos sellados por viviendas en las otras urbanizaciones. Pero otras cubiertas presentan también tonos azules y no están selladas. En toda la imagen, los tonos morados representan también cubiertas vegetales, tanto de vegetación de ribera, como

de los cultivos de regadío o algunas parcelas de cereales de secano. Los eriales y suelos desnudos o en barbecho presentan tonos más verdes y contrastan más con el resto de cubiertas.

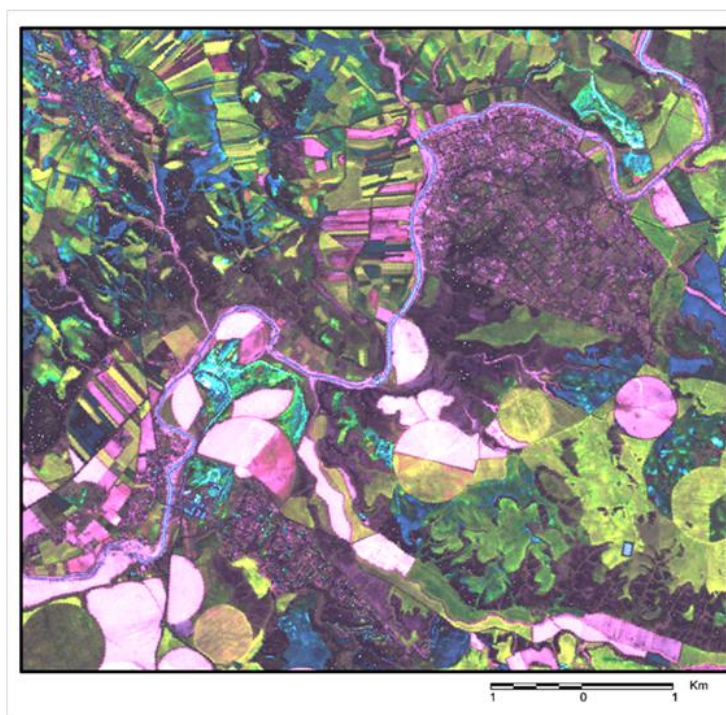


Fig. 27. IHS a RGB Spot 321

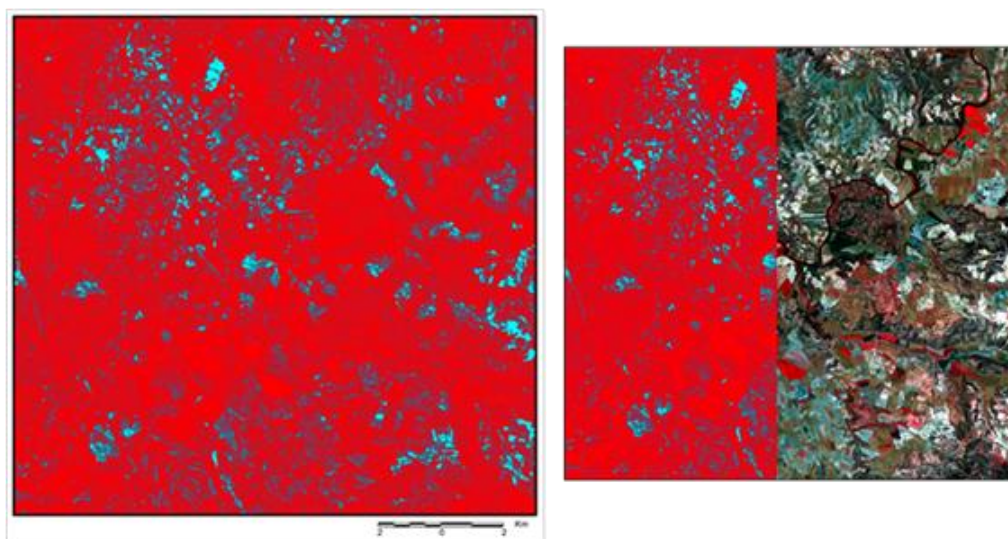


Fig.28. Imagen IHS a RGB Landsat 8 de 2013, solo sobreesalen las parcelas sin vegetación y detalle en *swipe*

Al igual que con la transformación RGB a IHS esta operación no es útil, utilizando sensores de resolución espacial media, para delimitar áreas urbanizadas. Sin embargo, sí resulta apropiada para ver las superficies con suelos desnudos. Éstas aparecen en tonos claros, como se puede observar al mostrarla mediante *swippe* en la superposición de la imagen transformada y la imagen original. Aquellos puntos que en

la imagen original tienen color blanco y corresponden a suelos desprovistos de vegetación, son los que en la nueva imagen presentan tonos azules. El resto aparece en color rojo sin diferenciar las distintas cubiertas (Fig. 28).

e) Índices

Los índices son operaciones matemáticas entre las bandas de diferente longitud de onda del espectro electromagnético, realizados con el fin de obtener una imagen que permita discriminar alguna característica específica: vegetación, arcillas, óxidos de hierro, etc. Estas funciones pueden ser, desde simples sumas, restas o cocientes entre bandas, a operaciones con raíces cuadradas, factores de conversión, etc. Tradicionalmente los programas de teledetección han incluido los índices entre las mejoras espectrales. Sin embargo, la última versión del programa Erdas Imagine los incluye entre las clasificaciones sin supervisar. Esto es bastante lógico ya que los índices son, en realidad, clasificaciones basadas en unos algoritmos matemáticos que intentan resaltar alguna propiedad específica de la superficie de la tierra. Los programas de teledetección tienen numerosos índices e incluyen también herramientas para que cada investigador, construya índices específicos. Para este trabajo hemos seleccionado aquellos que creemos pueden resultar más útiles para resaltar el sellado de los suelos.

- Índice de Edificación de la Diferencia Normalizada: NDBI

Este índice se realiza mediante el cociente de la resta y la suma de las longitudes de onda de 1650 y 830 nanómetros que corresponden al infrarrojo medio e infrarrojo próximo:

$$\text{NDBI} = \frac{\text{IRm} - \text{IRc}}{\text{IRm} + \text{IRc}}$$

Cabría pensar que, para detectar áreas urbanizadas, éste es el índice más adecuado. Sin embargo, en zonas semiáridas, con suelos con poca vegetación, es muy difícil que este índice permita delimitar las áreas selladas, ya que la reflectividad de ambas cubiertas es muy similar en estas regiones del espectro electromagnético.

Como se observa en la figura 29 no es fácil separar bien el área construida de las áreas con suelos con poca vegetación (eriales o campos en barbecho) que se sitúan en ambos márgenes del río y que aparecen, al igual que las urbanizaciones, en tonos grisáceos. Tampoco, por la coloración, es fácil distinguirla de la vegetación de ribera. En la imagen de detalle es más fácil discriminarla debido a las diferentes texturas de una y otras cubiertas. Sin embargo, con este índice sí se diferencian bien las parcelas de regadío, en tonos negros y los suelos totalmente desprovistos de vegetación, en color blanco.

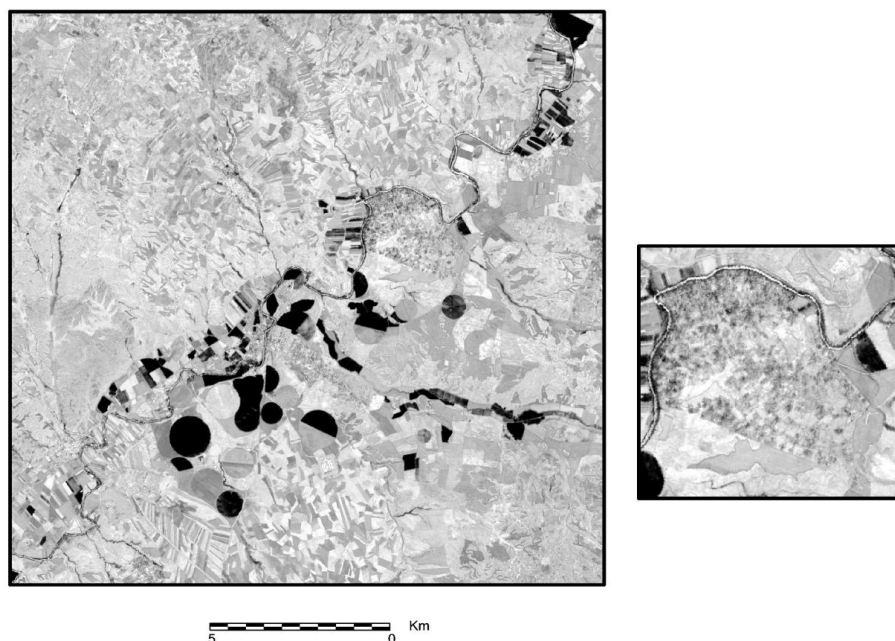


Fig. 29. Índice construido imagen Spot y detalle de la Urbanización de Río Llano

Con el satélite Landsat, con menor resolución espacial, la distinción resulta incluso más complicada. Por esta razón se le asignaron colores a los distintos valores del NDBI en una imagen de detalle comparando las fechas de 2013 y 1984

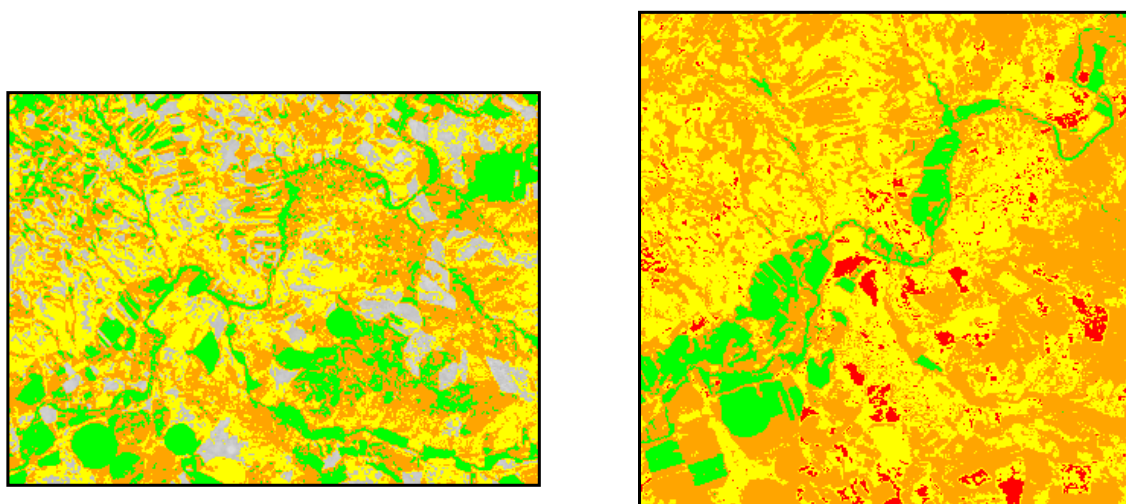


Fig.30. Detalle del NDBI en las imágenes Landsat de 2013 (izquierda) y 1984 (derecha)

En la primera imagen, 2013, se observa que la mayor parte de la urbanización aparece en tonos anaranjados (valor de 0 a 0,23), mientras que en la imagen de 1984 en que la urbanización apenas tenía la estructura de las calles, la mayoría aparece en tonos amarillos (valores de 0,23 a 0,30). Pero, en ambas, la confusión con el resto de cubiertas con poca vegetación es muy grande ya que aparecen también en tonos amarillos o naranja. Las cubiertas vegetales, en color verde, tienen NDBI negativos, por lo que sí se

diferencian. Los suelos desnudos, color rojo, tienen valores superiores a 0,30 por lo que también es posible diferenciarlos. Por tanto, en ambos sensores, es muy difícil separar, en ámbitos semiáridos con sedimentos detríticos yesíferos, arcillosos y arenosos, los suelos con eriales de los suelos sellados por acción antrópica (Fig. 30).

- *Índice de suelos.* Este índice se establece con la relación entre las bandas 2 y 1 del satélite Spot ($(B2-B1)/(B2+B1)$) que corresponden a las longitudes de onda de 0,645 y 0,545 micrómetros (Y-G/Y+G). En el satélite Landsat estas longitudes de onda están, ambas, en la banda 2 por lo que no es posible obtener una nueva imagen de este índice.

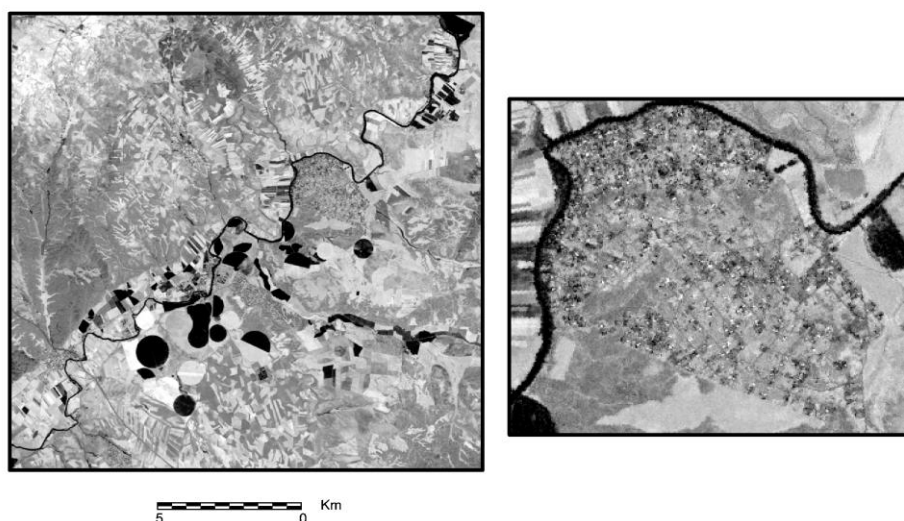


Fig. 31. Índice de suelo en la imagen Spot 5 y detalle

En la figura 31 se observa que el área sellada parece en tonos grises oscuros, por lo que se confunde con otras áreas con poca vegetación en la orilla derecha del río. En la imagen de detalle sí se pueden percibir las calles y estructura de la urbanización. Aunque da una mejor definición que el NDBI, tampoco es demasiado útil.

- *Índice de óxidos de hierro:* este índice resalta aquellos materiales ricos en óxido de hierro. Dado que el hierro tiene una alta reflectancia en las longitudes de onda del rojo, este índice se hace con el cociente entre las longitudes de onda 660/480 que, en el satélite Spot, corresponde a la relación entre las bandas 2/1 y en el Landsat 5 a la relación entre los canales 3/1. En este índice, pues, solo intervienen bandas del visible.

En la imagen Spot (Fig. 32) se delimita bastante bien el área sellada de las tres urbanizaciones, aunque se confunde con algunos materiales yesíferos. En la imagen de detalle se delimita la estructura del entramado de calles. En la imagen Landsat (Fig.33) la discriminación es mejor ya que las urbanizaciones tienen tonalidades más oscuras y,

aunque con menor resolución espacial, su mayor precisión espectral permite establecer mejor estas diferencias. En todo caso, sigue habiendo algo de confusión con otras cubiertas que tienen poca vegetación.

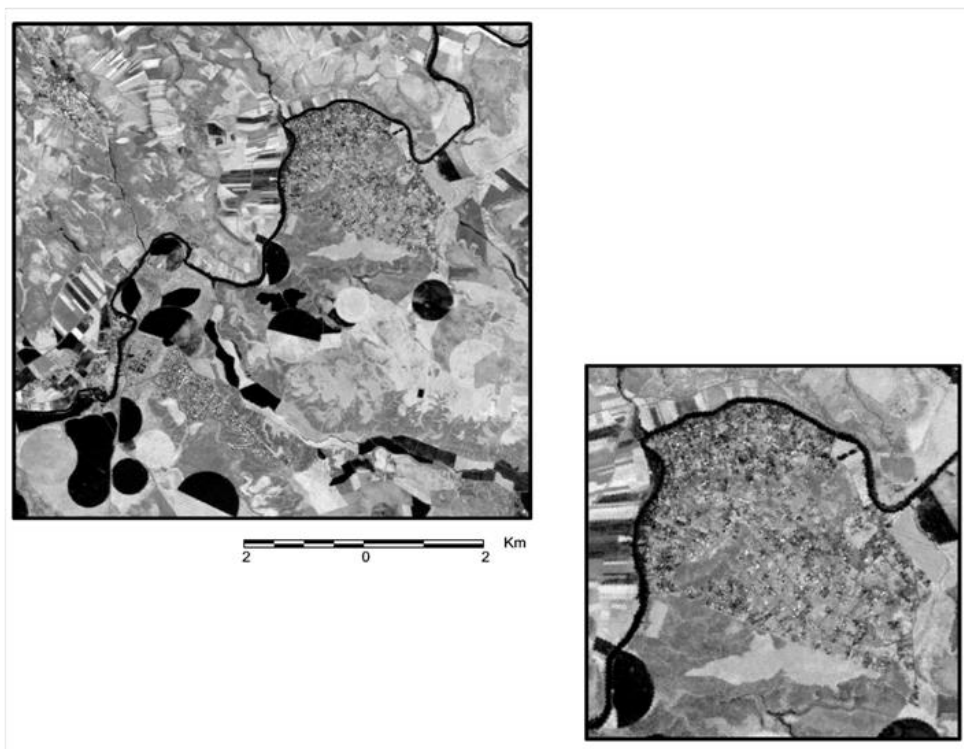


Fig. 32. Índice óxidos de hierro en la imagen Spot 5

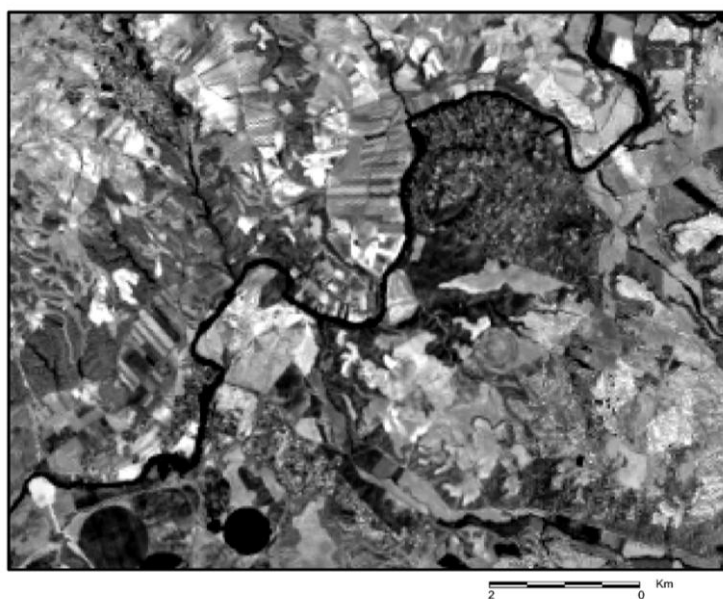


Fig. 33. Índice óxidos de hierro en la imagen Landsat 8

- Índice de composición mineral

Los programas de teledetección tienen numerosos índices para tratar de determinar mediante los valores digitales las distintas composiciones minerales. Pero estos índices, salvo que el material sea muy homogéneo, ofrecen dificultades de interpretación. Por esto se han hecho nuevos índices que mezclen tres índices minerales utilizándolos como tres bandas de forma que, al asignarles los tres cañones de color, permitan una mejor visualización del terreno. Aquí hemos seleccionado el índice de composición mineral para el satélite Landsat que genera una imagen en color (RVA) a partir de los índices de óxido de hierro ($B3/B1$), minerales de la arcilla ($B5/B7$) y minerales ferrosos ($B5/B4$).

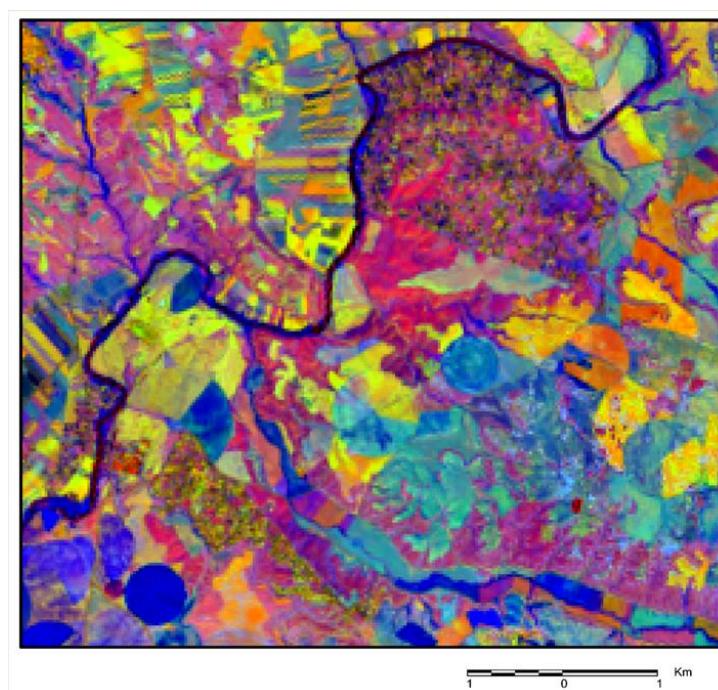


Fig. 34. Composición mineral de la imagen Landsat 8

En la imagen se observa que las tres urbanizaciones se identifican bien, especialmente la urbanización El Ballestar situada al suroeste, ya que tiene más densidad de edificaciones. Las viviendas aparecen en colores amarillentos-verdosos y la vegetación en tonos azulados. Los colores fucsia corresponden a áreas con poca vegetación. Tanto por las tonalidades de color como por la textura, este índice resulta apropiado para cartografiar áreas selladas ya que permite discriminar bastante bien los distintos tipos de cubiertas.

- Índice hidrotermal

Se utiliza para diferenciar zonas de alteración. Aunque, en principio, no cabría pensar que es muy útil para delimitar áreas selladas, sin embargo ofrece buenos resultados. En el satélite Landsat se obtiene por la combinación de tres cocientes entre

bandas: B5/B7, B3/B1, B3/B4. El primer cociente se establece entre regiones del infrarrojo medio del espectro electromagnético, ya que éstas permiten discriminar cubiertas con mucha humedad, el segundo cociente es entre bandas del visible y corresponde al índice de óxidos de hierro y el tercero se forma por la relación entre el infrarrojo próximo y el rojo, que resalta bien la vegetación. Con ellos se obtiene una nueva imagen de tres bandas.

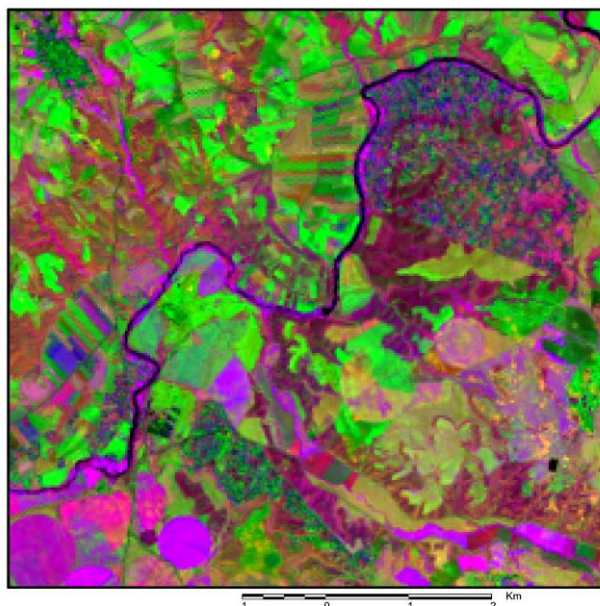


Fig. 35. Índice de alteración hidrotemal de la imagen Landsat 8

La urbanización de río Llano se distingue bien en tonos azulados y fucsia, aunque en algunos casos puede confundirse con áreas con mucha vegetación, especialmente aquellas parcelas más arboladas. Las casas tienen tonos más verdosos como puede verse en la urbanización de El Ballestar y el núcleo urbano de Estemera. Por tanto, con este índice es posible cartografiar las áreas selladas cuando la densidad de edificación es elevada; sin embargo, cuando la edificación está muy mezclada con parcelas de vegetación la identificación basada en color es compleja, si bien es posible delimitarla por la textura.

Para tratar de discriminar mejor el área sellada se ha hecho una clasificación supervisada (Fig. 36) sobre esta imagen. En ella se separan bien las áreas urbanizadas pero tiene el problema de incluir en urbano algunos sedimentos yesífero arcillosos con poca cubierta vegetal, próximos a las márgenes del río. Las otras clases: vegetación natural, cultivos, suelos desnudos o en barbecho, agua y cultivos de secano quedan bastante bien definidas. Al igual que ocurre con otros índices estudiados, el mayor problema para delimitar los suelos sellados se encuentra en su confusión con algunas cubiertas de escasa vegetación.

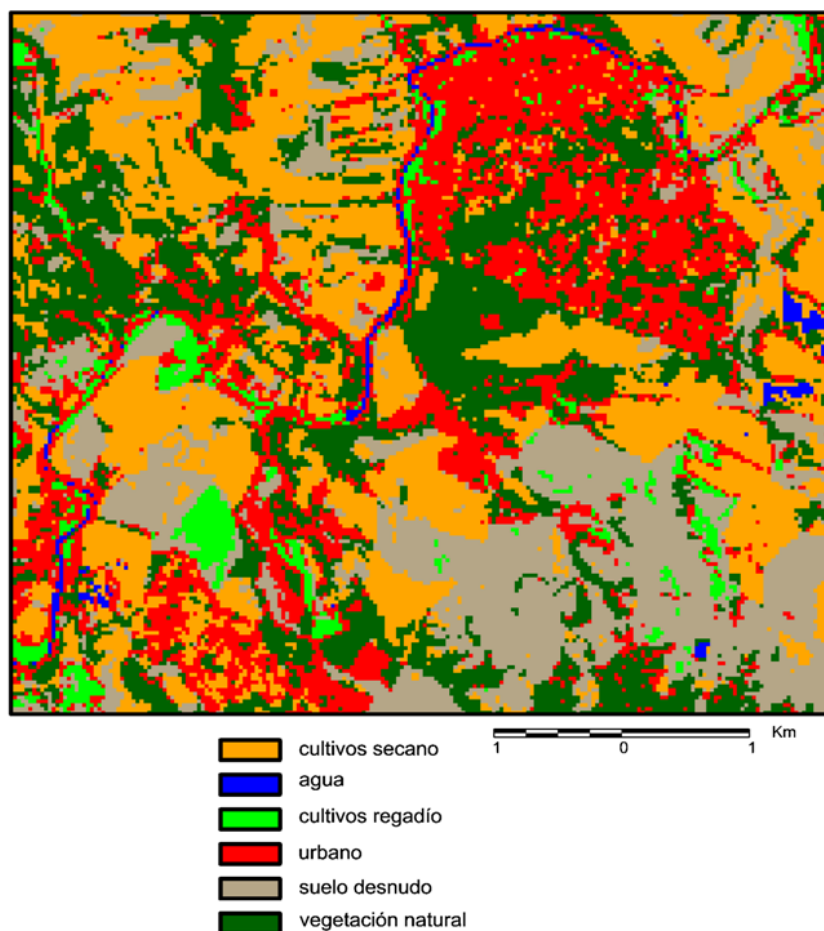


Fig. 36. Clasificación supervisada mediante el algoritmo de la mínima distancia a partir de la imagen del índice hidrotérmico

- *Índice de Infrarrojos medio.* Este índice se establece entre dos porciones del espectro infrarrojo, el cociente entre 1650 nanómetros y 2215 nanómetros que en el satélite Landsat corresponde a las bandas 7 y 5 y en el satélite Spot a la 4 y la 3. Por tanto es un índice útil en estudios geológicos ya que resalta la humedad y facilita la identificación de distintas litologías aunque no es demasiado eficaz para discriminar suelos sellados.

En tonos muy blancos aparecen las cubiertas vegetales, tanto por cultivos como por vegetación de ribera. En las urbanizaciones se identifican bien las masas arboladas y parcelas con césped, pero no se distinguen bien los suelos sellados, que pueden confundirse con suelos de escasa vegetación. El agua aparece en tonos muy oscuros.

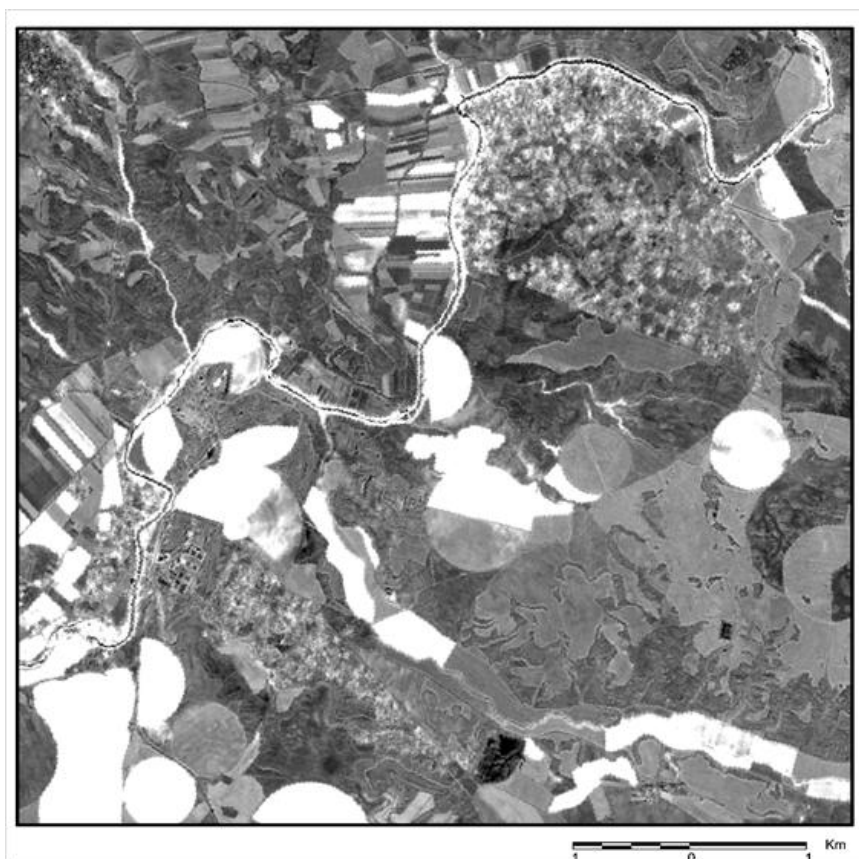


Fig. 37. Índice *Infrarrojos medio* de la imagen Spot 5

Índice de agua. Este índice es adecuado para cartografiar masas de agua y terrenos afectados por humedad. Se forma por el cociente entre la diferencia de la banda del azul y el infrarrojo próximo y la suma de estas mismas bandas. En el caso del satélite Landsat es $(1-4)/(1+4)$.

Destacan las áreas con más humedad en tonos blancos. A pesar de los 30 metros de resolución del sensor del Landsat se perfila perfectamente el curso de agua del río Tajo que en otros índices queda oculto por la vegetación de ribera. Sin embargo, este índice no es muy útil para discriminar suelos sellados, aunque puede marcar las áreas con más peligro de inundación.

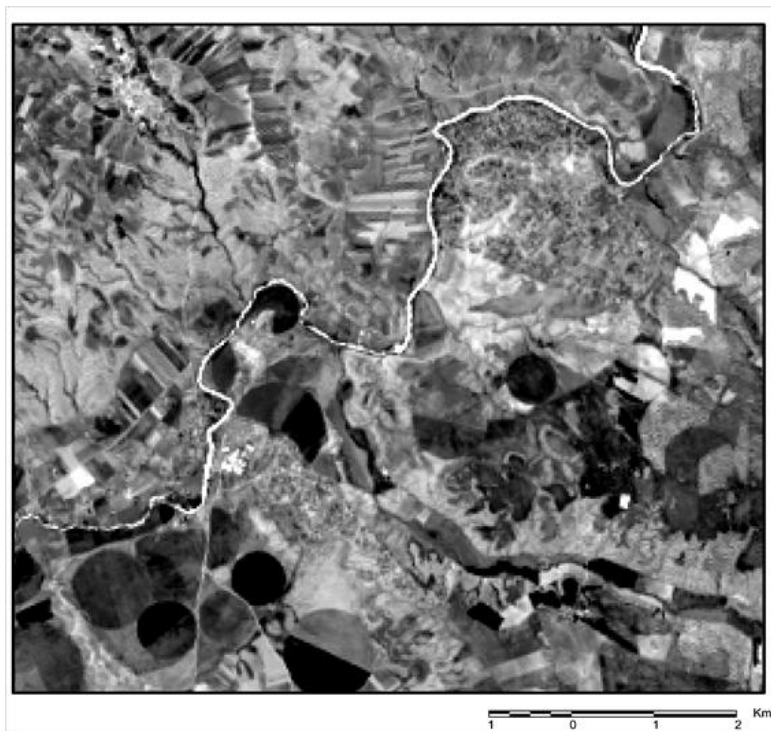


Fig. 38. Índice de agua de la imagen Landsat 8

- *Índice de stress de la humedad.* Este índice se utiliza para detectar la humedad y su relación con la vegetación, por lo que emplea el cociente entre los canales del infrarrojo medio e infrarrojo próximo.

En la figura 39 las urbanizaciones se reconocen por el mosaico irregular de tonos grises entremezclados con blancos. Los tonos más claros indican una mayor humedad, como se observa en el cauce del río. Pero no es un índice muy adecuado para utilizar en cartografía sellado del suelos, salvo para ver, como en el índice anterior, zonas con más riesgo de inundación.

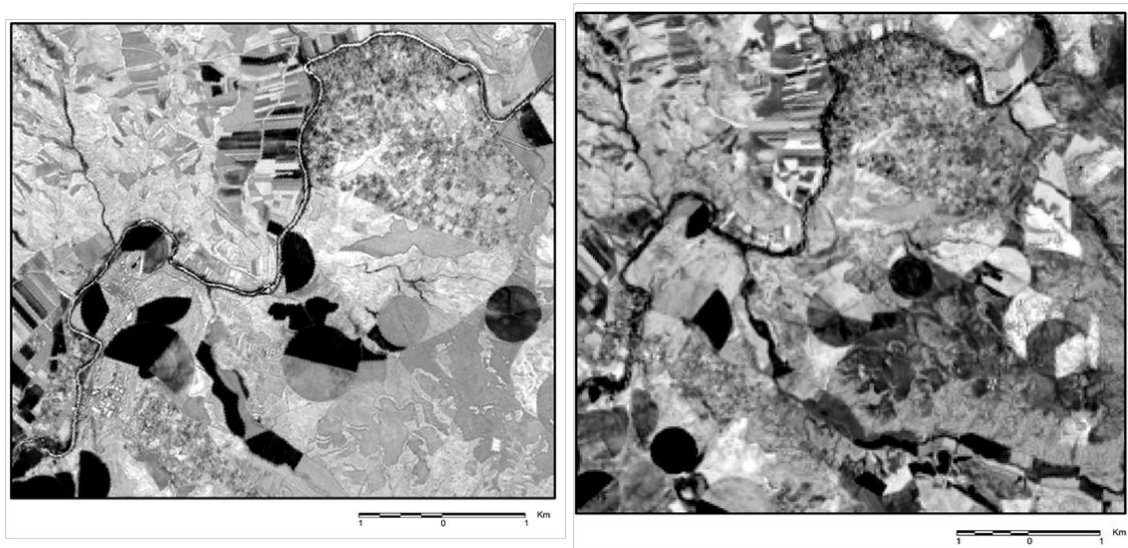


Fig. 39. Índice *stress* de la imagen Spot 5 (izquierda) y de la imagen Landsat (derecha)

La menor resolución espacial de este satélite frente a Spot hace que en esta imagen se perfilen peor los cursos de agua, puesto que la resolución de 30 metros implica que los píxeles incluyan la vegetación de ribera, aún en ríos tan caudalosos como el Tajo, por lo que el cauce queda marcado por intercalaciones e tonos blancos (agua) y negros (vegetación). Esta menor resolución hace que también se delimitan peor los núcleos con población.

- *Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada*

En Teledetección se utilizan numerosos índices de vegetación, realizados a partir de distintos algoritmos matemáticos entre las porciones del espectro electromagnético del infrarrojo próximo (en el que la vegetación tiene una alta reflectancia) y del color rojo (en el que la vegetación tiene baja reflectancia). De todos ellos el más utilizado es el índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada, NDVI, que se establece con la relación:

$$NDVI = \frac{IRc - R}{IRc + R}$$

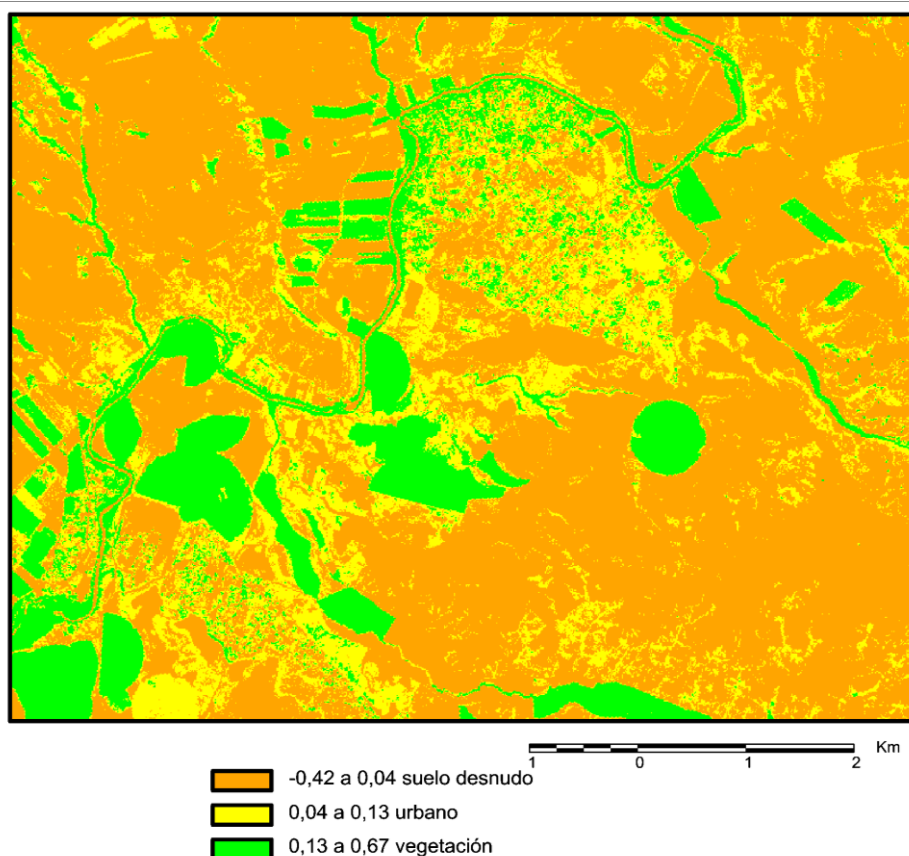


Fig. 40. NDVI color de la imagen SPOT

Para obtener esta imagen se le ha asignado el color naranja a los valores más bajos de NDVI, el amarillo a los intermedios y el verde a los más altos. Los suelos sellados aparecen en tonos amarillos, aunque todas las urbanizaciones, al tener mucha vegetación entremezclada con las casas, tienen también numerosos píxeles en tonos verdes. En la urbanización de Río Llano se observa que la vegetación es más densa en las proximidades del cauce fluvial, mientras que en el resto de la urbanización salpica de forma irregular toda la superficie.

- Índice SAVI. Este índice se originó al observar que el NDVI no recogía la influencia del suelo cuando el área de estudio no tiene una vegetación muy densa. Es similar al anterior ya que utiliza los mismos canales espectrales pero incluyendo un factor de corrección que minimiza la distorsión que crea el suelo:

$$SAVI = \frac{(IRc - R) * (L + 1)}{IRc + R + 1}$$

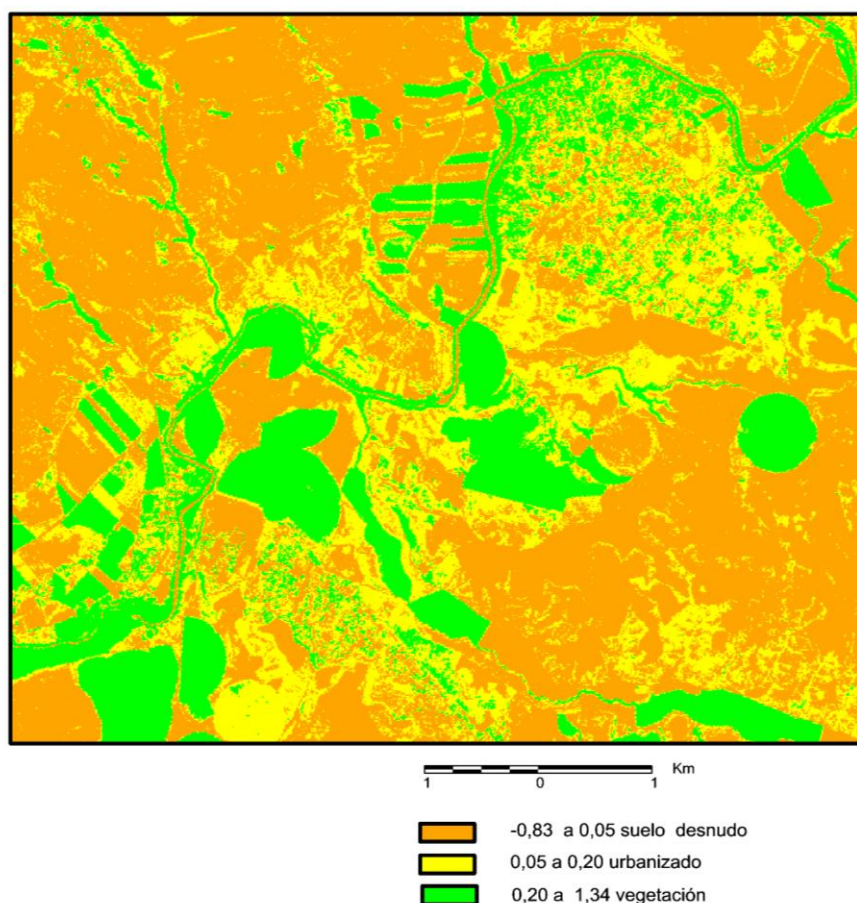


Fig. 41. Índice SAVI de la imagen Spot

Este índice cartografía bien las áreas con vegetación densa, bien sea arbolada, matorrales, céspedes o cultivos, por lo que esta clase es similar a la de la imagen anterior. Sin embargo, al reducir el efecto del suelo, los intervalos de los valores varían

y el límite entre clases es distinto, pudiéndose observar que el área sellada se distingue mejor de las superficies que presentan poca vegetación, por lo que la discriminación entre estas dos clases, si bien no es perfecta, sí es más fiable.

- Índice de absorción de la clorofila. La clorofila se detecta bien debido a la mayor absorción de energía electromagnética en las bandas del visible azul y rojo y su gran reflectancia en el verde e infrarrojo próximo. Por lo que se ha establecido un índice bastante complejo utilizando las longitudes de onda de 800, 670 y 500 micrómetros (infrarrojo próximo, rojo y verde). En el Landsat 5 corresponden a los canales 4,3 y 2 y en el Spot 5 a las 3, 2, 1. El índice se construye con la siguiente operación:

$$\text{Absorción clorofila} = \frac{(1,5 * (2,5 * \text{IRc} - \text{Rojo}) - 1,3 * (\text{IRc} - \text{Verde}))}{\sqrt{((2 * \text{IRc} + 1)^2 - (6 * \text{IRc} - 5 * \text{SQRT}(\text{Rojo} - 5))}}$$

Este índice resalta muy bien la vegetación, por lo que se delimitan con claridad los cultivos en regadío y secano, la vegetación higrófila que delimita todo el cauce del río Tajo y la vegetación localizada entre las viviendas de las urbanizaciones. Así, aunque directamente, no serviría para cartografiar el suelo sellado, sí se puede hacer a través de los patrones de distribución de la vegetación en las urbanizaciones. Se ha coloreado la imagen asignando colores a los distintos valores del índice de forma que se distingue bien la distribución espacial de la vegetación entre las áreas selladas (Fig. 42)

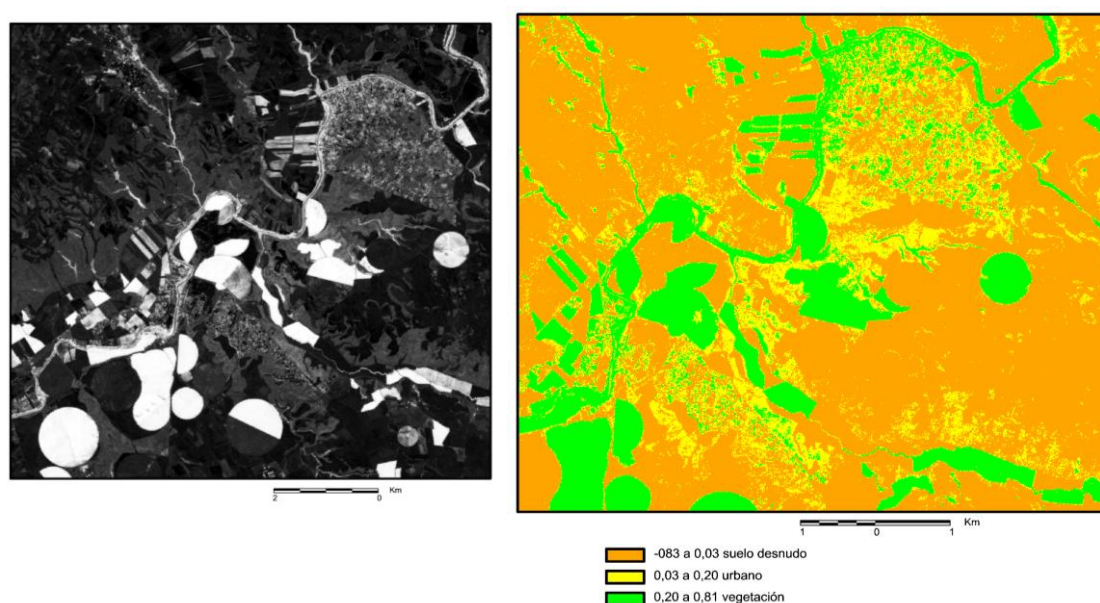


Fig. 42. Índice de absorción de clorofila en la imagen Spot en pancromático y color

IV) *Perfiles espectrales, espaciales y superficiales*

Además de la interpretación visual de las imágenes en teledetección es muy importante la interpretación de los valores digitales. Para ello se ha seleccionado una imagen en color natural (321) del Landsat 8 y un falso color (432) del satélite spot 5 y se han efectuado distintos perfiles, con todas las bandas espectrales. Los satélites Spot y Landsat 5 tienen una resolución radiométrica de 8 bits frente a los 12 del Landsat 8, lo que hace que éste tenga más tonos de grises.

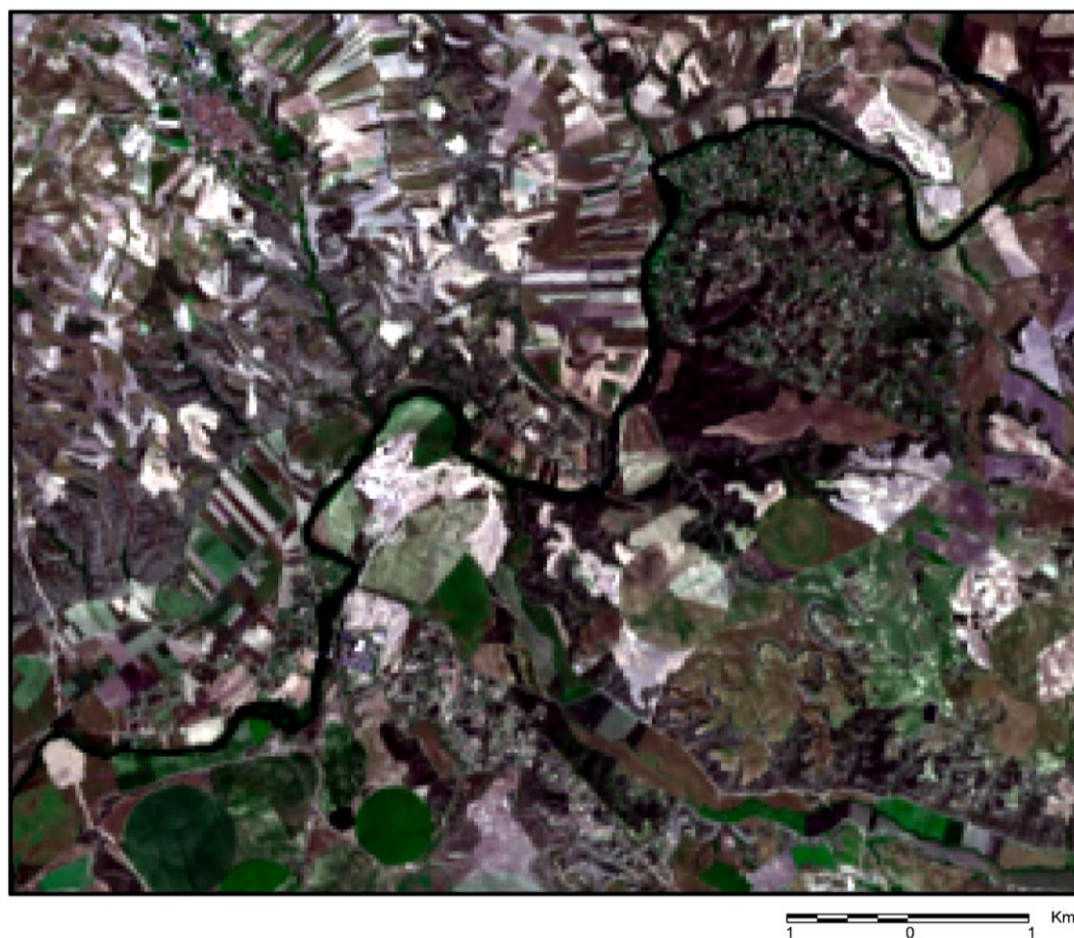


Fig. 43. Imagen en color natural, Landsat 8

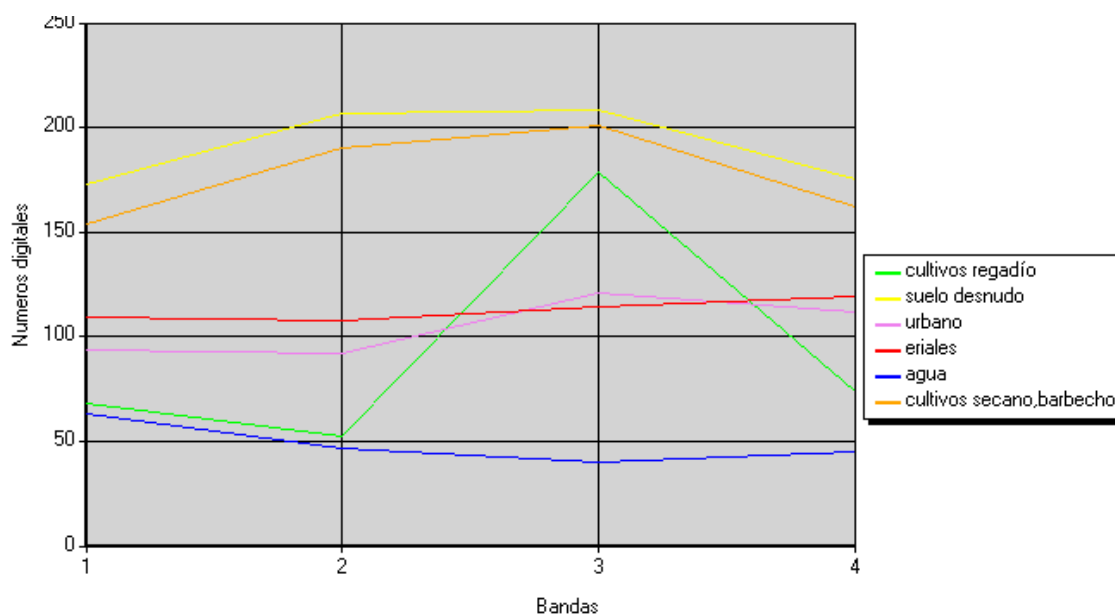


Fig. 44. Perfil espectral de la imagen Spot

Los suelos desnudos y las parcelas que se han dejado en barbecho tienen valores digitales muy altos en todas las bandas del Spot, por lo que al clasificarlos son difíciles de separar. Eriales y urbano tienen valores intermedios, también muy próximos entre ellos. Esta es la razón por la que siempre dan problemas para distinguirlos, en cualquier clasificación o índice que se utilice. Por el contrario, la vegetación (cultivos de regadío) tiene una curva muy específica con valores altos en el infrarrojo próximo (banda 3). El agua absorbe mucho la radiación electromagnética por lo que su perfil es muy bajo en todas las bandas.

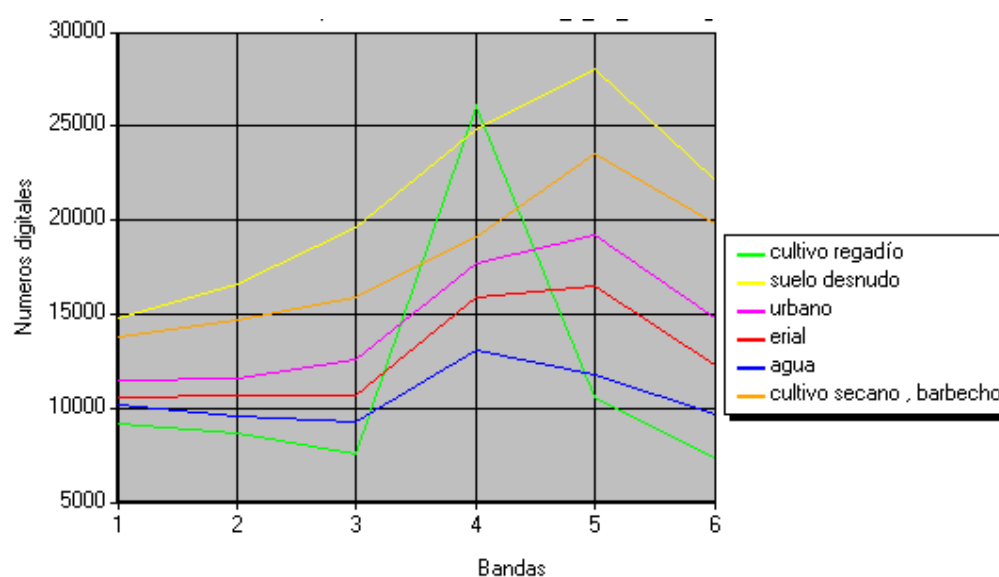


Fig. 45. Perfiles espectrales en la imagen Landsat 8

En la figura 45 se puede ver que, aunque las curvas espectrales de la clase urbana y de los eriales es parecida, con valores más elevados en la banda 5 (infrarrojo medio), sin embargo, ambas se distinguen porque en todos los canales son más altos los valores del suelo urbano que del erial. Esto implica que en las clasificaciones pueda ser más fiable la utilización de este sensor del Landsat, que el del Spot, aun teniendo menos resolución espacial. Es decir, la mejor resolución espectral puede compensar la menor resolución espacial. Suelos desnudos y barbechos tienen una alta reflectancia. Los cultivos destacan en la banda 4 y el agua tiene siempre valores bajos, por lo que todas estas cubiertas se pueden diferenciar bien de los suelos sellados.

Con las seis bandas utilizadas para este estudio del Landsat 8 (azul, verde, rojo, infrarrojo próximo y dos infrarrojos medios) se han efectuado perfiles longitudinales, cortando la urbanización de Río Llano de NO a SE desde las proximidades del río Tajo hasta los sectores más elevados. La irregularidad de los cortes con oscilaciones importantes en sus valores digitales se debe a la heterogeneidad de las cubiertas, con mezcla de suelos sellados y parcelas con vegetación natural u ornamental. La banda del infrarrojo próximo (4) muestra valores elevados debido a la amplia superficie de masa vegetal que, además, en algunos puntos es bastante densa. La banda del infrarrojo medio (5) tiene también valores elevados ya que hay también mucha superficie sellada por viviendas.



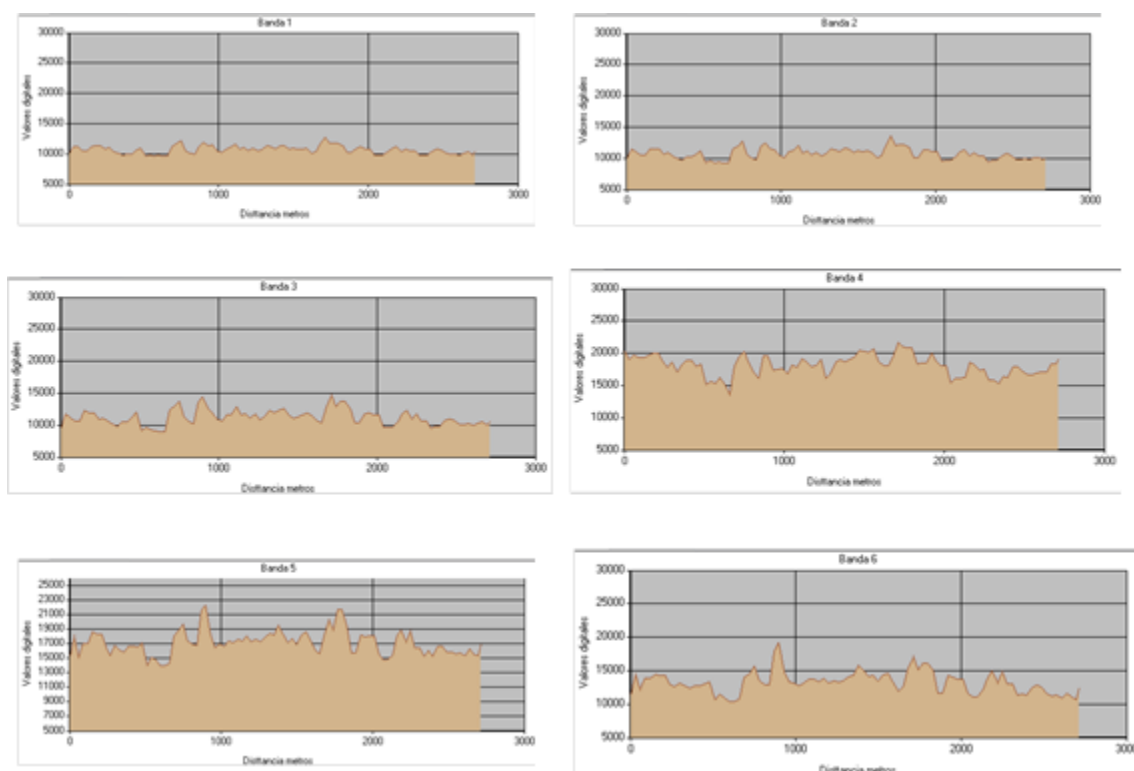


Fig. 46. Transecto y perfiles longitudinales en la imagen de Landsat 8 (432)

La imagen Spot se ha seleccionado para realizar un perfil superficial ya que su alta resolución espacial facilita la interpretación de estos gráficos siempre difíciles de ver. Se ha seleccionado la urbanización de Río Llano para comprobar si la mezcla de casas y jardines propios de las urbanizaciones con viviendas unifamiliares se reflejaba en el perfil. Como se puede observar en los gráficos de las distintas bandas hay muchas oscilaciones en los valores digitales con picos y valles debidos a esta heterogeneidad en las cubiertas.

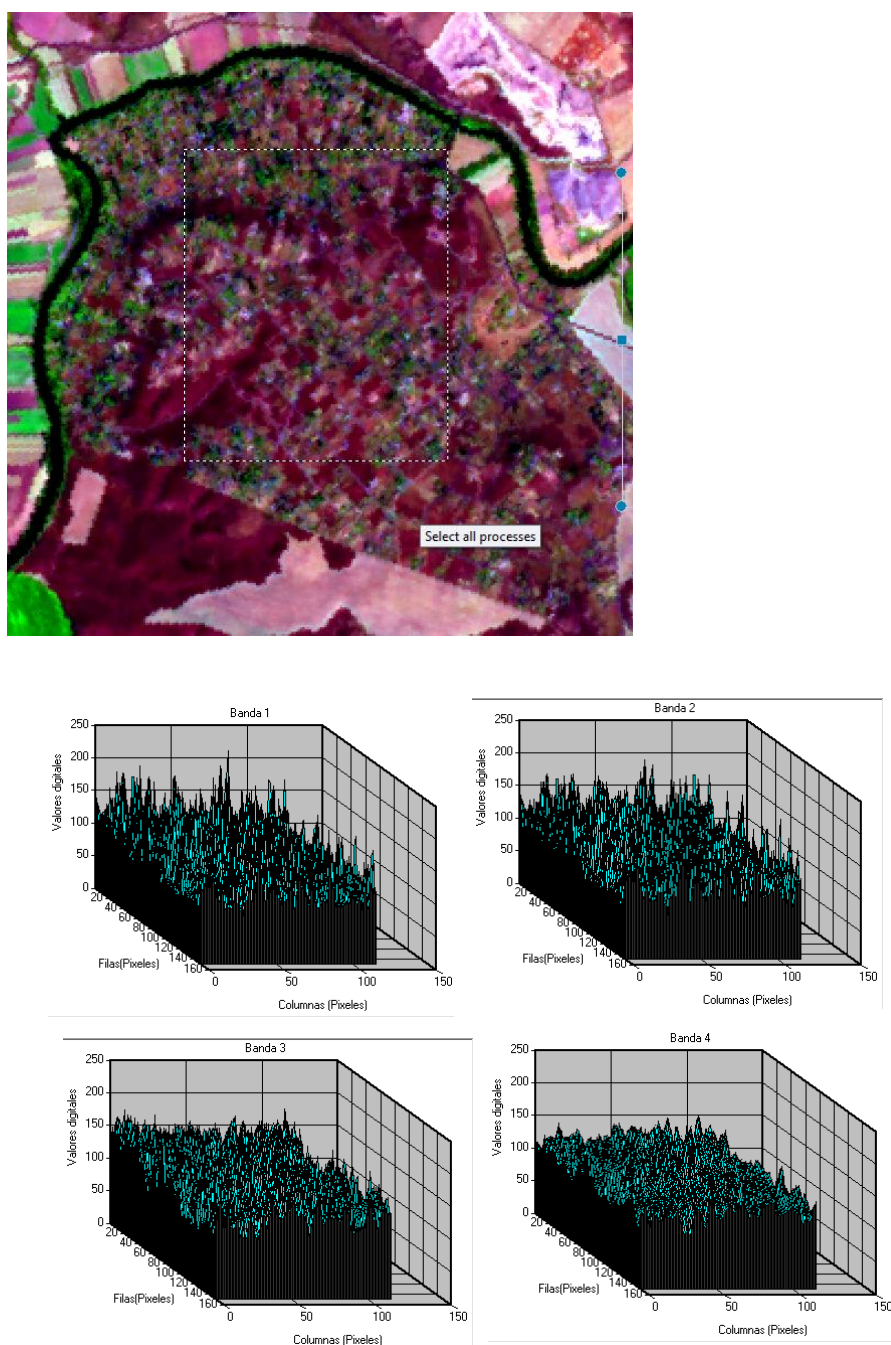


Fig. 47. Perfiles superficiales en la imagen Spot, combinación 431

V) *Análisis de cambios temporales*

Una parte sustancial del estudio multitemporal del sellado de suelos trata de evaluar cuantitativa y cualitativamente la pérdida del suelo. Para ello, se aplica la función de *detección de cambios* entre las imágenes de diferentes fechas (Fig. 48). Debe tenerse en cuenta la importancia en la selección primera de las imágenes, pues además de evitar pérdida de calidad por nubosidad deberán corresponder a épocas del año similares (siempre que sea posible) para no añadir a las operaciones los cambios por

fenología. También, hay que seleccionar la banda que quiere compararse, pues la *detección* solo se calcula para un canal espectral. Aquí se selecciona la banda correspondiente al azul del visible (1 del sensor TM y 2 del sensor 8), pues es muy sensible a los cambios de humedad en el suelo y permite determinar las variaciones en la superficie urbanizada y en la cubierta vegetal.

Para destacar los resultados y poder evaluar los cambios en el área piloto seleccionada se ha aplicado la función de *detección de cambios* sólo al polígono correspondiente a la urbanización, pues el entorno sigue manteniendo los usos del suelo tradicionales (regadíos, secano y eriales).

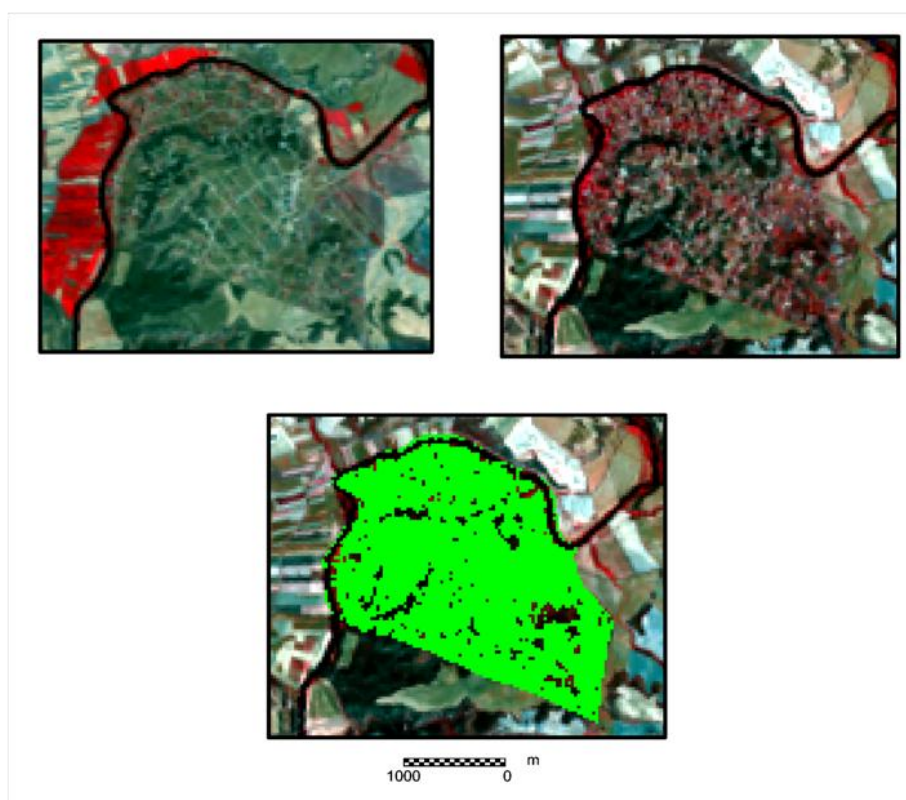


Fig. 48. Imágenes Landsat de 1984 y 2013: determinación de cambios en la banda 1 entre ambas fechas

En la imagen resultante de los cambios entre 1984 y 2013 refleja en verde la transformación casi completa de la urbanización analizada. Los únicos suelos que no presentan cambios se corresponden a los sectores de mayor pendiente en los que se mantiene el suelo sin modificar y que está colonizado por matorral xerófilo. Además, la imagen de cambios muestra el incremento en la humedad del suelo, debido al notable aumento de la vegetación “plantada” en las parcelas de viviendas unifamiliares. Este hecho dificulta enormemente la determinación y cartografía de los suelos sellados discontinuos. Así, en este tipo de urbanismo parece adecuado aplicar un coeficiente corrector a las medidas sobre sellado de suelos (García *et al*, 2013 y 2014), pues parte

de la superficies cartografiadas en ocasiones como selladas mantienen gran parte sin impermeabilizar.

VI) *Clasificación sin supervisar*

Finalmente, se ha realizado una clasificación sin supervisar con la imagen Spot multiespectral para representar la superficie sellada en la actualidad en el área piloto entre Madrid y Guadalajara. Se aplicaron 36 clases informacionales que fueron posteriormente reagrupadas en siete categorías: suelo sellado, dos tipos de cultivos en regadío en función de su grado de desarrollo, herbáceo-matorral, eriales, parcelas en barbecho y agua. A continuación y para conocer el grado de fiabilidad de la clasificación se calculó la matriz de confusión, con 30 puntos de control y se contrastó con la imagen pancromática Spot 5 de igual fecha y la verdad terreno. Este test demostró un error notable en la clasificación de algunas categorías, confundiendo en ocasiones los suelos sellados con otros de alta reflectividad (barbechos, suelos degradados, eriales o suelos con escasa cobertura de vegetación, eriales y matorrales). Por ello, puntualmente se recodificaron algunos errores entre categorías y se aplicó de nuevo la matriz de confusión, alcanzando el 97 % de fiabilidad en la clasificación final. En ella quedan bien representados los diferentes tipos de sellado:

- núcleo rural muy concentrado y sin apenas espacios sin impermeabilizar
- urbanizaciones junto al río, de amplias parcelas revegetadas y, en proporción, poca superficie construida; destacando algunas por estar asentadas en la misma llanura de inundación del río Tajo
- infraestructuras viarias, que son más fácilmente clasificables por su distribución lineal

Como se muestra en la figura 49 las imágenes Spot también resultan muy adecuadas para la cartografía de la vegetación. En esta área se muestra el mantenimiento de la actividad agrícola en regadío (gracias a la facilidad al agua dulce del río), la abundante orla de vegetación de ribera a lo largo del río Tajo y el abandono de gran parte de la actividad agrícola en secano que está siendo ocupada por una rala vegetación xerófila, con escasa cobertura del suelo.

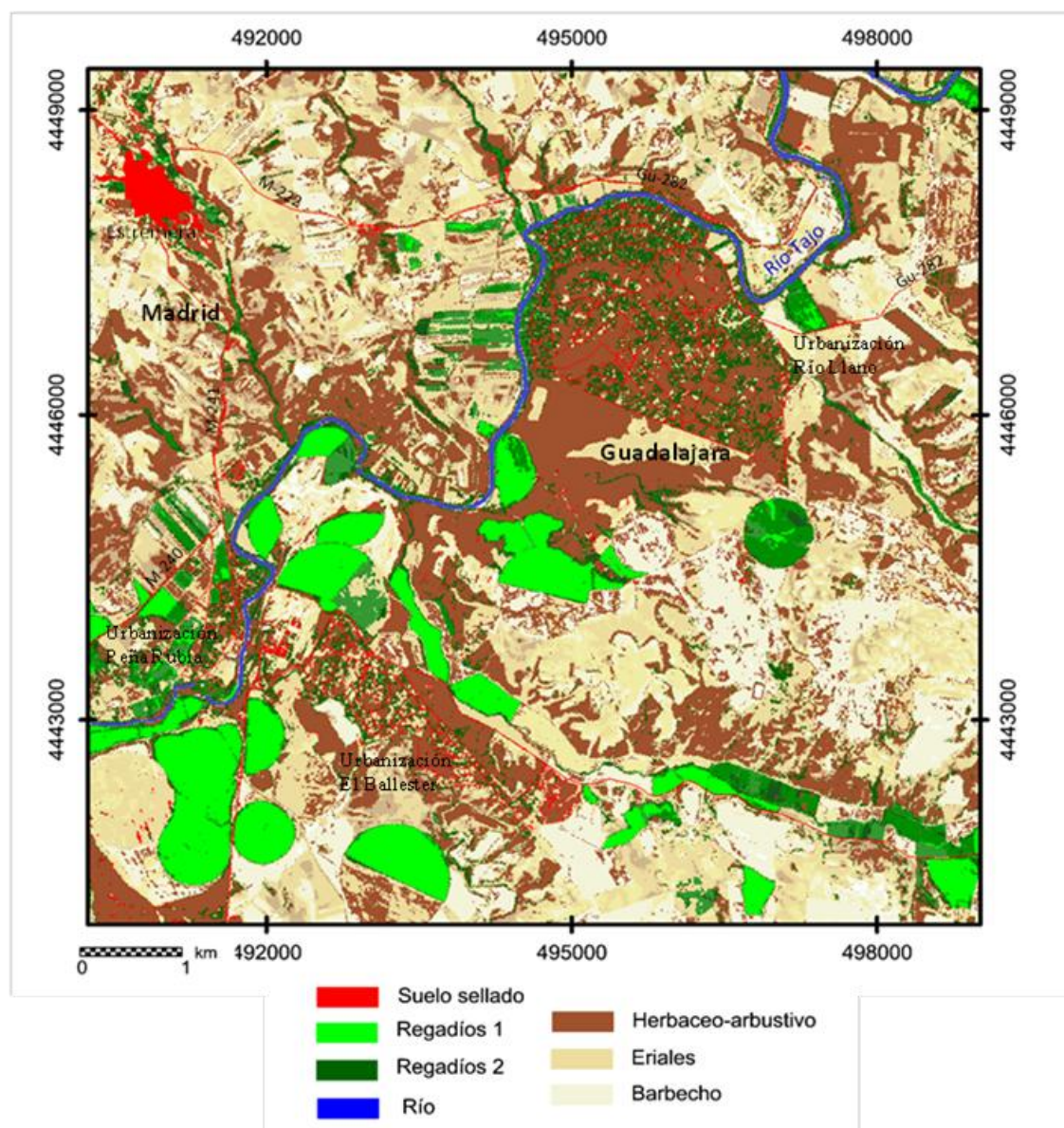


Fig. 49. Clasificación sin supervisar a partir de la imagen Spot 5

CAMBIOS EN EL PAISAJE VEGETAL

Biogeográficamente y siguiendo a Martínez Rivas (2007), este territorio se incluye en las unidades corológicas: Región: Mediterránea; Provincia Mediterránea Central Ibérica; Subprovincia Castellana; Sector Manchego; Subsector Manchego Sagrense; Distrito: Bajomatricense.

Bioclimáticamente se trata de un clima mesomediterráneo pluviestacional oceánico (Rivas Martínez, 2004). Las precipitaciones oscilan entre los 350 y 550 mm anuales.

Bajo este epígrafe se incluyen tanto la vegetación potencial en cualquiera de sus estados (clímax, matorral o monte bajo) como las transformaciones paisajísticas del territorio debido a los usos y aprovechamientos: cultivos agrícolas, tanto leñosos (olivares, frutales, viñas...) como herbáceos, amén de los enclaves de plantación de pinares y choperas.

Si tenemos en cuenta los distintos vuelos disponibles para el territorio nacional:

- vuelo americano (1956-57) serie B
- vuelo interministerial (1973-86)
- vuelo nacional 1980-86,
- Ortofotos del IGN (2010)

y el mapa forestal (2000-2003) se puede observar como el cambio más importante se produce en los años 1970 con el desarrollo de la segunda residencia.

De esta manera las unidades que se representan son las siguientes (ver figura):

- Núcleo urbano/ Urbanización Río Llano, El Cuartillejo, etc. Aparecen de color gris
- Zonas de extracción de áridos. Son manchas de color rosa
- Cultivos agrícolas y prados artificiales. Aparecen de color naranja pálido
- Matorral. Localizado en color naranja fuerte
- Bosque de repoblación de especies del género *Pinus*. Son las manchas de color verde
- Vegetación de ribera o de galería. Son las manchas que bordean el río tajo de color azul oscuro.

Los cultivos ocupan la mayor parte del territorio analizado. Se trata de cultivos herbáceos con varias parcelas intercaladas de olivares y viñedos. En ocasiones, entre los cultivos agrícolas se desarrollan especies tales como *Tamarix gallica*, *Artemisia heba-alba* y *Salsola vermiculata*, incluso en las vaguadas aparecen especies como *Atriplex halimus* y *Phragmites australis*

La vegetación clímax del territorio está representada por encinares manchegos de la asociación *Asparago acutifolii-Quercetum rotundifoliae* (nueva denominación de *Bupleuro rigidi-Quercetum rotundifoliae*; Rivas Martínez & al., 2007). La etapa madura de esta asociación es un encinar de *Quercus rotundifolia* desarrollado sobre suelos ricos en bases generalmente cambisoles cálcicos y leptosoles réndricos

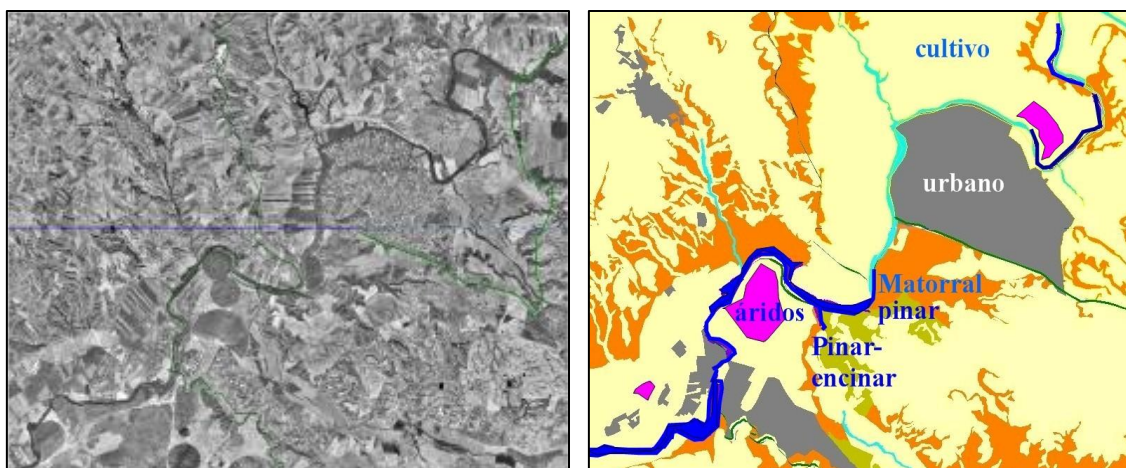


Fig. 50. Unidades homogéneas a partir de fotografía aérea (2010). Elaboración propia

Sin embargo su vegetación potencial no es un encinar, ni su etapa de menor degradación un coscojar (*Quercus coccifera*) más o menos aclarado. Dinámicamente, cuando el coscojar se destruye, es sustituido bien por retamares con aulagas (*Genisto scorpii-Retametum sphaerocarpace*) o bien por espartales (*Arrhenanthero erianthi-Stipetum tenacissimae*), o incluso matorrales retamares.

La orla forestal del encinar lo constituyen retamares con aliagas en los suelos profundos y en los más secos y abruptos, coscojares.

Otras etapas más degradadas están representadas por los espliegares melíferos y por los romerales termófilos. En este caso, estas manchas que aparecen bajo la denominación de matorrales claros gipsófilos y herbazal anual gipsófilo están formados por especies tales como esparto (*Stipa tenacissima*), con *Helianthemum squamatum*, *Thymus lacaetae*, *Thymus zygis*, *Salvia lavandulifolia* etc.

Otra zona representada son las manchas antrópicas arbóreas o bosques de plantación o repoblación. Se diferencian dos enclaves. Una formación mixta de pinar de pino carrasco (*Pinus halepensis*) y pino piñonero (*Pinus pinea*) con encina (*Quercus rotundifolia*), y otro enclave de *Pinus halepensis* con *Quercus rotundifolia* con retama de bolas (*Retama sphaerocarpa*) y *Stipa tenacissima*, *Helianthemum squamatum*, *Thymus sp.*

En cuanto a la vegetación riparia podríamos diferenciar pequeños enclaves de formaciones arbóreas mixtas de saucedo-fresneda-chopera, en las proximidades del enclave donde se sitúan casi todas las extracciones de áridos, en los límites del pinar con encinas y formado por especies de los géneros *Salix* (*S. alba*, *S. purpurea*), fresno común (*Fraxinus angustifolia*), *Populus* (*P. alba*, *P. nigra*, *P. x canadensis*), taray (*Tamarix gallica*), con carrizo (*Phragmites australis*), cañas (*Arundo donax*), olmos (*Ulmus minor*), espino albar (*Crataegus monogyna*).

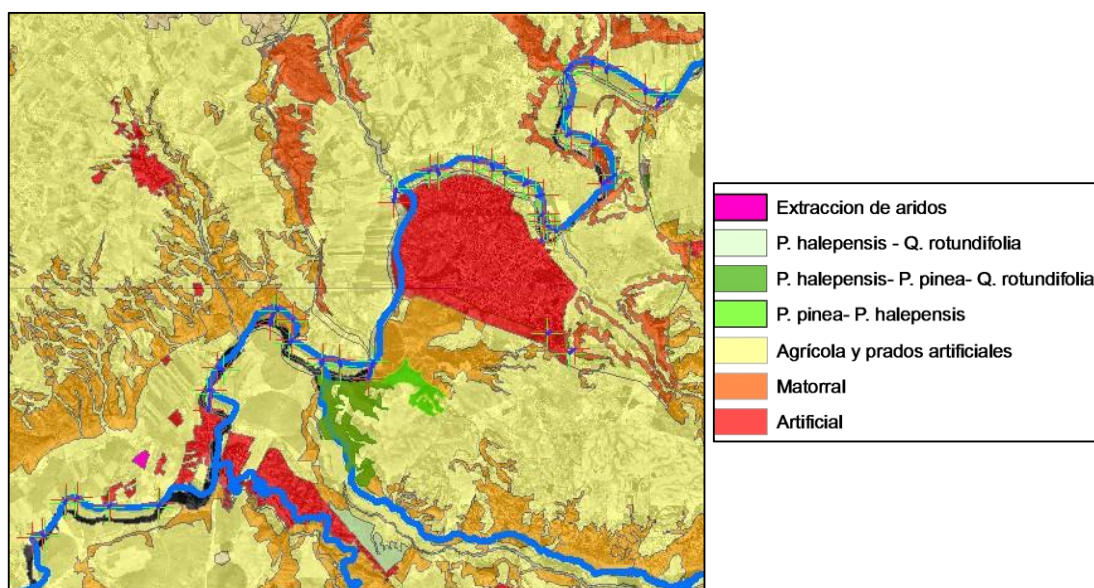


Fig. 51. Fuente: Mapa forestal de España.2000

A continuación se muestra una secuencia de fotogramas de diferentes años en los que se pueden apreciar la evolución del paisaje con estos cambios significativos:

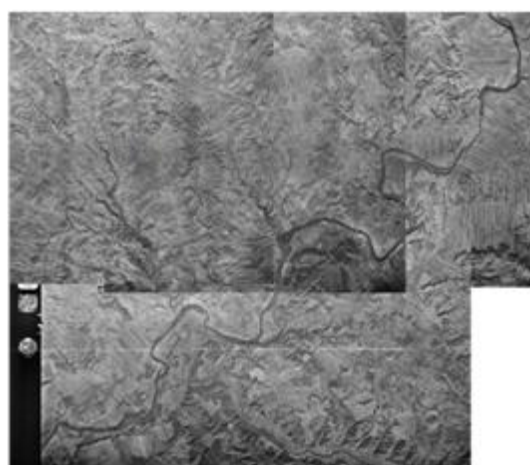


Fig. 52. Fotograma del vuelo americano 1956-57 serie B

A partir de este primer Vuelo (1956-57) lo primero que se observa es la no existencia de la Urbanización río Llano y la posibilidad de ver la presencia de un corto e incipiente humedal que en la actualidad tampoco existe y que también podría ser una mancha alargada y más densa de especies leñosas arbustivas.

Con el vuelo Interministerial ya empiezan a localizarse los primeros asentamientos y parcelarios de la urbanización aunque con pequeños retazos aún de matorral disperso. Por lo tanto hay una reducción del matorral aclarado en beneficio de la urbanización. Y con el vuelo del periodo 1980-86, se dibujan ya el entramado de calles y parcelas por fases. La primera fase son los asentamientos próximos a la orilla del río Tajo, la Urbanización El Soto-Río Llano, posteriormente El Cuartillejo y

Colonia de San Joaquín, tal y como se aprecia en los fotogramas, delimitados por la red viaria. Otro caso de asentamientos en las inmediaciones del río, en el cauce, se aprecia en la Urbanización Peña rubia y El Ballestar, respectivamente en el río Tajo y en el arroyo Calvache. Todo ello ocasiona pérdida del bosque de ribera y en otros casos degradación del mismo.

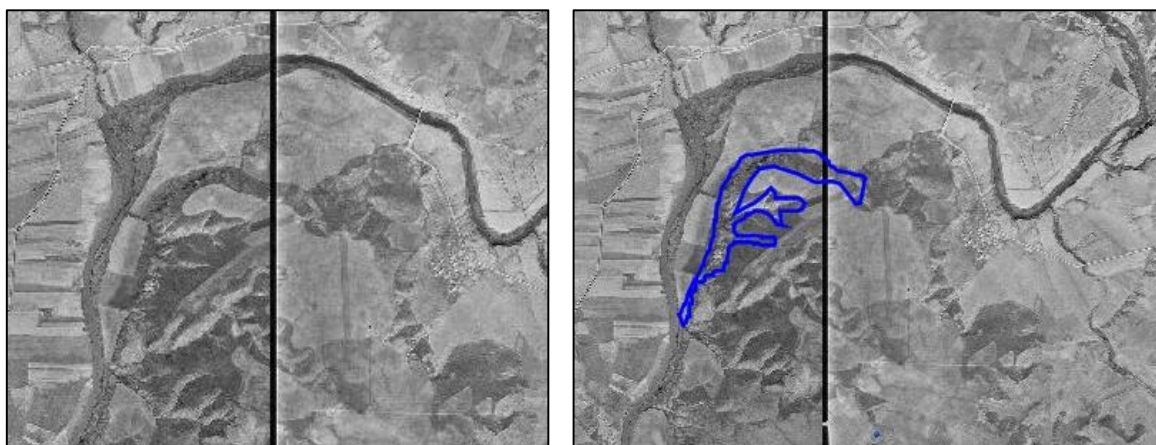


Fig. 53. Fotogramas de vuelo americano 1956 – 1957 Serie B. Iberpix. Se aprecia una masa más oscura irregular que aparece resaltada en color azul. Esta masa podríamos relacionarla con la presencia de un arroyo o de un meandro abandonado, aunque también con una masa arbórea. Si seguimos la secuencia, en el vuelo del año 1973 ya no se aprecia dicha masa (ver Vuelo 1973). Y en el vuelo de la década de los 80 ya es una urbanización desorganizada.



Fig. 54. Fotograma vuelo interministerial 1973-86



Fig. 55. Fotograma vuelo nacional 1984-1986



Fig. 56. Fotograma vuelo interministerial 1973- 86 y detalle de los primeros asentamientos junto a la margen del río, vuelo 1980-86. Este mismo modelo de urbanización en las proximidades del río se produce de nuevo en otras urbanizaciones tal y como se aprecia en los fotogramas referentes a los vuelos de los mismos años.

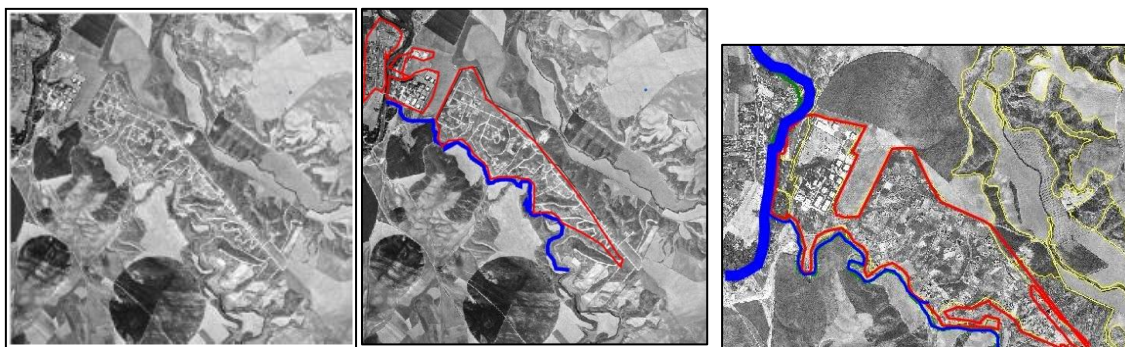


Fig. 57. Evolución del asentamiento de la Urbanización Valderío en el mismo margen del río (Fotogramas de los Vuelos 1973, 1980-86 y 2000).

También es significativo como áreas de cultivos agrícolas que se localizaban en las proximidades de la margen de río pasan en la década de los 80 (vuelo 1980- 86) se transforman en enclaves de extracción de áridos según el último vuelo disponible (2010).

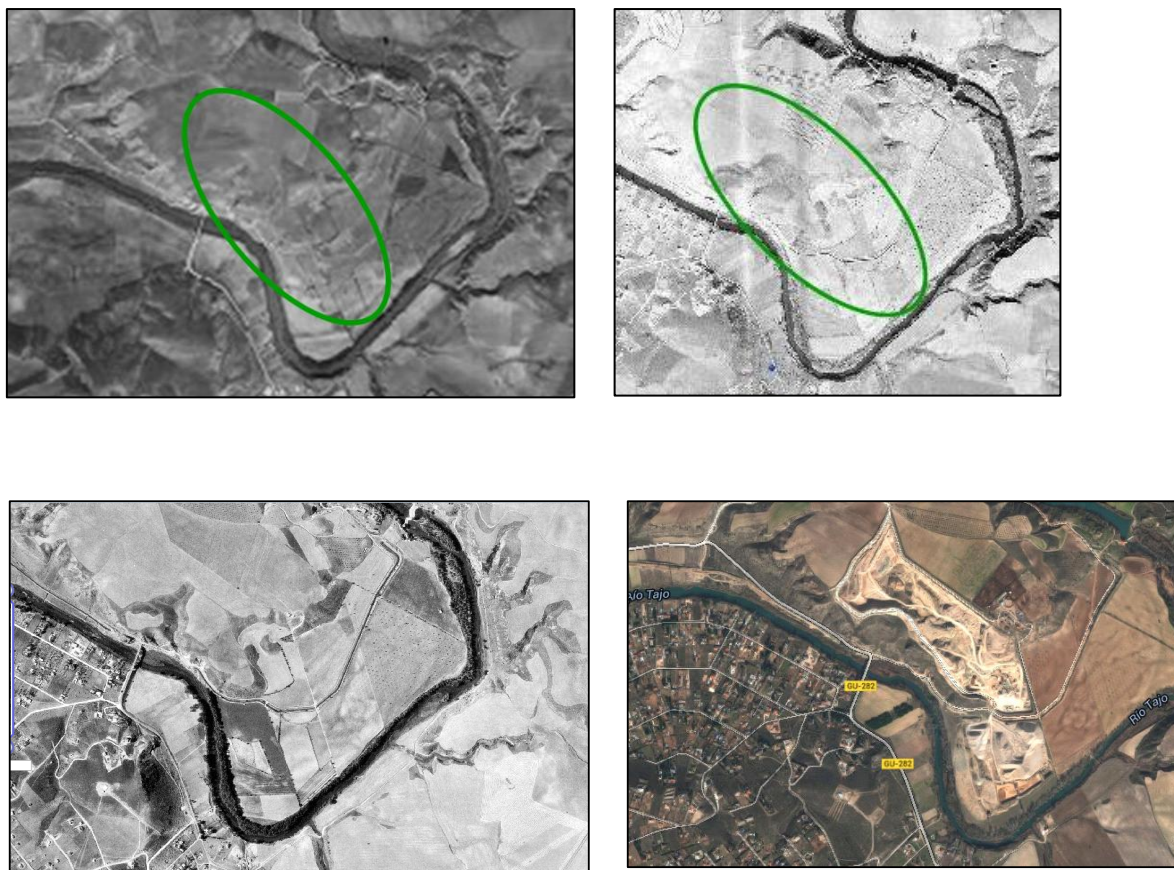


Fig. 58. Evolución y transformación de parcelas de cultivos agrícolas (fotogramas de los vuelos 1956-58, 1973 y 1980-86) en explotaciones de áridos (ortofoto del 2010, iberpix, Oign).

ANÁLISIS Y COMENTARIO DE IMÁGENES GEOGRÁFICAS

Aun viendo la importancia de los Sistemas de Información Geográfica y de las imágenes aéreas y espaciales, es importante también si se desea hacer un estudio detallado del territorio, estudiar e interpretar las fotografías tradicionales tomadas en el campo. A modo de ejemplo, para este estudio se ha seleccionado una fotografía de la urbanización de Río Llano

Comentario

ANÁLISIS

I. Localización.

Illana (Guadalajara).

Castilla-La Mancha

II. Tipo de paisaje.

Agrario y residencial.

III. Unidades y elementos paisajísticos.

Margen derecha.

- Terrenos de bosque y matorral.
- Cultivos de cereal.

Río Tajo y riberas.

- Sotos fluviales.
- Urbanización de chalets.
- Vegetación de ribera y ornamental.

Margen izquierda.

- Vías, parcelas y chalets
- Áreas sin urbanizar y de matorral

IV. Factores.

Naturales.

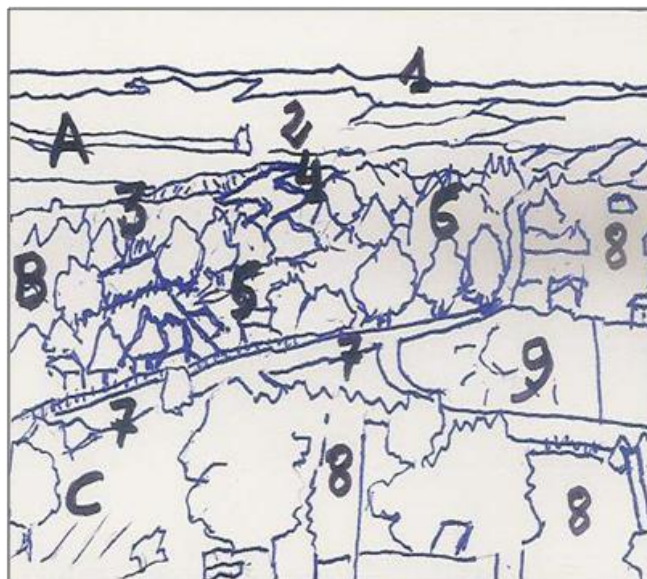
- Topografía llana y de pendientes suaves.

- Clima mediterráneo seco de interior.

- Vegetación esteparia y bosques claros

Antropicos.

- Actividad agrícola tradicional.
- Uso residencial de la ribera fluvial.



La imagen muestra el cambio de usos del suelo en la ribera y áreas colindantes de un río, fruto de una urbanización que se levanta sobre estos terrenos. Es un paisaje residencial y agrario, perteneciente al valle del Tajo, en la comarca de La Alcarria, y localizado concretamente en la urbanización de Río Llano, en el municipio de Illana (Guadalajara). En el conjunto cabe observar las tres unidades que lo integran: la margen derecha (A), que ocupa la parte superior de la imagen, la ribera del río Tajo (B), en el centro, y la parte inferior (C), en el área más elevada de la margen izquierda.

La primera unidad consta de varios espacios diferenciados por su aprovechamiento y caracteres. La parte más elevada (1) está formada por bosque claro de pinar y matorral estepario, mientras que a sus pies (2) domina el paisaje de cereal, cultivos de regadío y el barbecho característico de esta España seca.

La parte central de la imagen (unidad B) pertenece a río Tajo y su ribera. La orilla derecha (3) está formada por los cantiles yesosos del río Tajo y su lecho de inundación, cubierto de prados, junqueras, carrizos y arbustos, y a continuación el propio Tajo (4), que sigue un curso zigzagante. Finalmente, en la orilla izquierda se localiza una urbanización de chalets (5), con piscinas y pistas deportivas, que llegan hasta la propia orilla del río, y casi enteramente cubierta con árboles de ribera y ornamentales (6)

La parte inferior corresponde a la orilla más elevada del valle fluvial (C), donde es posible distinguir la carretera principal de la urbanización (7), situada en el borde del lecho de inundación, las áreas de transición entre éste y la terraza superior (8), constituida por parcelas sin urbanizar, vías urbanas y chalets, y en último término las áreas más elevadas y secas (9), sin urbanizar, que están formadas por depósitos fluviales de conglomerados y son el dominio de las hierbas y el matorral estepario.

Se trata de un claro ejemplo de la transformación de un paisaje agrario tradicional, perteneciente a la comarca de La Alcarria, en el valle del Tajo, que ha pasado a convertirse en urbano y residencial gracias a la creación de una urbanización de segundas residencias, como ocurre con otras muchas zonas parecidas en las proximidades de una gran ciudad, Madrid.



Fig. 59. Vista del río Tajo y urbanización El Soto-Río Llano

CONCLUSIONES

El análisis del sellado de suelos o huella antrópica en el tramo medio-alto del río Tajo demuestra que en pleno siglo XXI se siguen manteniendo patrones urbanísticos que responden únicamente al precio del suelo o al sorteo de la legislación existente sin tener en cuenta apenas las interacciones con el medioambiente.

A menos de 90 km de la capital de España se han construido urbanizaciones en áreas de alto riesgo medioambiental, al localizarse en parte sobre la llanura de inundación o primera terraza del río Tajo (Peña Rubia en su margen derecha y Río Llano, en su margen izquierda) o sobre materiales ricos en yesos, susceptibles de disolución y colapso si se incrementasen los aportes hídricos superficiales considerablemente.

La alta disponibilidad de bases de datos espaciales, cartografía temática, fotografías aéreas e imágenes de satélite facilita el análisis y seguimiento del sellado de suelos, si bien cada fuente será idónea para una escala espacial y temporal concreta.

Para determinar la pérdida de suelo por sellado en pequeños núcleos rurales de ambiente semiárido y urbanizaciones unifamiliares con amplios espacios ajardinados se requieren imágenes de satélite de resolución alta (10 m o inferior) o realizar mezclas entre imágenes multiespectrales de resolución media con otras de mayor resolución.

De todas las técnicas de Teledetección para determinar la huella antrópica resulta conveniente el uso de filtros de convolución (3x3 *summary* y *sharpen*), pues mejora la separación de elementos lineales y discriminación del parcelario. Sorprende la mala respuesta del índice de edificación, pues confunde lo construido con suelos sin cobertura vegetal, que en comarcas rurales de clima semiárido, con gran abandono de cultivos, son la mayoría. Por el contrario, los índices de vegetación, por defecto, son más adecuados para medir el sellado del suelo, siendo el índice de absorción de clorofila el que resulta más fiable, si bien hay que tener en cuenta el patrón espacial.

La clasificación temática del sellado de suelos a partir de imágenes multiespectrales en pequeños enclaves (núcleos rurales y urbanizaciones abiertas) ha requerido recodificación en algunas categorías. La corrección de la imagen clasificada con bases de datos espaciales fiables y la verdad terreno ha permitido ofrecer una fiabilidad del 97 %.

BIBLIOGRAFÍA

García Alvarado, J. M^a, Pérez González, M^a E. y García Rodríguez, M^a P. 2014. Revisión del concepto de sellado de suelos y propuesta de tipología urbana. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 34: 87-103.

- García Rodríguez, M^a P.; Pérez González, M^aE. 2007. Changes in soil sealing in Guadalajara: cartography with Landsat images. *Science of Total Environment*, 41. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.048.
- García Rodríguez, M^a P. y Pérez González, M^a E. 2010. Aplicaciones de la teledetección en Geografía Física en la Universidad Complutense de Madrid. *Serie Geográfica*, 16: 9 – 18.
- García Rodríguez, M^a P. y Pérez González, M^a E. 2011. Sellado de fluvisoles en la comunidad de Madrid análisis a partir de imágenes Landsat. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 31:125-137.
- García Rodríguez, M^a P.; Sanz Donaire, J. J.; Pérez González, M^a E.; Navarro Madrid, A. 2013. *Guía práctica de Teledetección y fotointerpretación*. UCM, 153 pp.
- García Rodríguez, M^a P. y Pérez González, M^a E. 2014. Análisis multitemporal del urbanismo expansivo en el Corredor del Henares. Aportación de las imágenes de satélite. *Estudios Geográficos*, LXXV, 277, pp. 597-618.
- García Rodríguez, M^a P.; Pérez González, M^a E. y Guerra Zaballos, A.M. 2014. Using TM images to detect soil sealing change in Madrid (Spain). *Geoderma* 214–215, 135–140.
- Guerra, A. y Monturiol, F. (Dir) 1970. Mapa de suelos de la provincia de Guadalajara escala 1/250.000. C.S.I.C. Madrid.
- Pérez González, M^a E. y García Rodríguez, M^a P. (2013). Aplicaciones de la Teledetección en degradación de suelos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. 61: 285-308.
- Pérez González, M^a E. y García Rodríguez, M^a P. 2013. *Sellado de suelos en áreas con riesgo de inundación*. XV Congreso de Teledetección. INTA, Madrid. 373-376. En: Editores: Fernández-Renau González-Anleo, A. y Miguel Llanes, E. (2013). *Teledetección. Sistemas Operacionales de Observación de la Tierra*. Madrid.
- Rivas Martínez, S. *et al* 2002. *Itinera Geobotanica n° 15*, vol 15-1 y 15-2 Asociación Española de Fitosociología. Servicio de Publicaciones Universidad de León. León
- Rivas Martínez, S. *et al*. 2007. *Itinera Geobotanica n° 17*, Nueva Serie. Asociación Española de Fitosociología. Servicio de Publicaciones Universidad de León. León
- Rivas Martínez, S. *et al*. 2011. *Itinera Geobotanica n° 18*, tomos 18-1 y 18-2. Asociación Española de Fitosociología. Servicio de Publicaciones Universidad de León. León.
- Sanz Donaire, J.J., García Rodríguez, M.P., Pérez González, M.E.; Redondo García, M.M. y Navarro Madrid, A. 2014. 2014. *Casos prácticos de Teledetección y Fotointerpretación en Madrid y Guadalajara*. PIMCD 52/2012-13 Universidad Complutense de Madrid.
- WRBSR .2011-. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. FAO Roma

Accesos web:

<http://www.igme.es>. Último acceso el 10 de octubre de 2014

<http://www.madrid.org/> Último acceso el 15 de octubre de 2014

<http://www.ign.es/> Último acceso el 1 de octubre de 2014

<http://www.internotes.cajaespana.es> Último acceso el 21 de noviembre de 2014

<http://www.ine.es/nomen2/> Último acceso el 24 de noviembre de 2014